

**MODELO DE OPTIMIZACION DEL CONSUMO UNITARIO DE CARBÓN DEL
PROCESO RKEF EN CERRO MATOSO S.A.**

Autores:

Luis Carlos Bonilla Flórez

Rubén Rangel De Hoyos

Dirigido por:

Ingeniero Medardo González

Universidad del Norte

División de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Industrial

Maestría en Ingeniería Administrativa

Montelíbano/Córdoba

2016

CONTENIDO

CONTENIDO.....	2
Capítulo 1. La Empresa.....	7
Descripción general de la empresa Cerro Matoso S.A	7
Vision, misión, política y valores de Cerro Matoso S.A.....	8
Cultura de Cerro Matoso S.A.	9
Descripción de la operación de Cerro Matoso S.A.....	10
Planteamiento del problema.....	13
Objetivos	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos:.....	22
Metodología	23
Capítulo 2:	27
Marco Teórico	27
Marco Conceptual.....	30
Optimizacion	31
Ciclo CAP-DO.....	35
Proceso de Calcinación y Reducción-Fusión	36
Proceso de calcinación.....	37
Proceso de Reducción y fusión	39
Capítulo 3.....	47
El modelo de programación lineal: función objetivo, variables de decisión y restricciones	47
Capítulo 4.....	76
Validación y análisis de resultados	76
4.1 Análisis resultados línea 1.	78
4.2 Análisis de resultados para la línea 2.	82
Capítulo 5.....	97
Conclusiones y Recomendaciones	97

Lista de figuras

Figura 1.1 Visita Satelital CMSA.....	7
Figura 1.2 Diagrama de fases proceso de producción de FeNi.....	11
Figura 1.3 Distribución de equipos en proceso de producción de FeNi en CMSA.....	12
Figura 1.4 Pareto ton no producidas de Ni en FY16.....	17
Figura 1.5 Relación contenido viscosidad/FeO.....	17
Figura 1.6 Relación (%Ni metal) Vrs (Kg Carbón/Ton mineral).....	18
Figura 1.7 Consumo de Carbón Vrs % de Ni en Escoria L1.....	20
Figura 1.8 Ciclo CAP-DO.....	23
Figura 2.1 MODELO CONCEPTUAL.....	29
Figura 2.2 Método Grafico.....	32
Figura 2.3 Ciclo CAP-DO.....	34
Figura 2.4 Reacciones químicas que ocurren en el calcinador.....	36
Figura 2.5 Esquema horno eléctrico para fundición de laterita en ferroníquel.....	39
Figura 2.6. Reacciones químicas que ocurren en el horno eléctrico.....	40
Figura 3.1 Balance masa unitario del proceso RKEF para línea 1.....	47
Figura 3.2 Balance de masa unitario del proceso RKEF para línea 2.....	47
Figura 3.3 Distribución de valores de conversión de carbono para las dos líneas de producción.....	52
Figura 3.4 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	55
Figura 3.5 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	55
Figura 3.6 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina.....	57
Figura 3.7 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	58
Figura 3.8 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	59
Figura 3.8 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	60
Figura 3.10 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	61
Figura 3.11 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	62
Figura 3.12 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina.....	63
Figura 3.13 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	64
Figura 3.14 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	64
Figura 3.15 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=10 en calcina.....	65

Figura 3.16 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	66
Figura 3.17 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	67
Figura 3.18 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina.....	67
Figura 3.19 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina.....	68
Figura 3.20 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina.....	69
Figura 3.21 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=10 en calcina.....	69
Figura 3.23 Distribución de posición de electrodos y %Fe en escoria de L1 para el FY16	72
Figura 3.23 Correlación lineal Posición de electrodos vs %Fe en escoria.....	73
Figura 4.1 Distribución de datos promedio día de relación Fe/Ni en calcina L2 para el FY16.....	81
Figura 4.2. Distribuciones de %conversión carbón para L1 y L2.....	84
Figura 4.3 Distribución de datos de %Ni y relación Fe/Ni en pila para FY16.....	85
Figura 4.4 Regresión que correlaciona Fe/Ni en pila con Fe/Ni en calcina L1.....	87
Figura 4.5 Regresión que correlaciona Fe/Ni en pila con Fe/Ni en calcina L1.....	87

El informe del proyecto que figura en este documento no ha sido presentado previamente para optar por un título o diploma en esta o en cualquier otra institución de educación superior. Es resultado del conocimiento y creencia de los autores y no contiene ningún material publicado o escrito por otra persona excepto donde previamente se hace la debida referencia.

Los Autores.

Introducción

Existen diferentes tipos de empresas mineras, cada una de ellas con procesos especiales para la transformación de la materia prima básica, que es el recurso mineral, y de ésta forma poder generar y comercializar productos de valor para el mercado regional y mundial. La empresa Cerro Matoso S.A., es un complejo minero-metalúrgico, perteneciente a la multinacional South 32, cuyo objeto social es la producción de la aleación ferroníquel (FeNi) a partir de mineral laterítico, cuyos principales componentes para el proceso de transformación son Ni, Fe, Si, Mg y Al.

El proceso de Producción de ferroníquel en Cerro Matoso S.A., se lleva a cabo a través de los procesos de Minería, Trituración, Secado, Calcinación, Fundición, Refinación y Comercialización.¹

El proceso integrado de calcinación fundición consta principalmente de dos hornos rotativos denominados calcinadores donde se realiza la calcinación y pre-reducción del mineral, en serie con dos hornos eléctricos donde se completa la reducción y se lleva a cabo fundición del mineral generando dos fases inmiscibles: escoria y metal .

En el capítulo 1 se realiza una descripción general de la empresa Cerro Matoso S.A. enfocado principalmente en el área de calcinación-fundición por ser la etapa del proceso productivo relacionada con el proyecto.

¹ CERRO MATOSO S.A. Manual de calcinación fundición, año: 2011.

En el capítulo 3 se presenta la metodología del trabajo desarrollado, que básicamente consistió en la formulación de un modelo de programación lineal, es decir una función objetivo de utilidad del proceso, unas variables de decisión relacionadas con la función utilidad y unas restricciones que condicionan los valores que las variables de decisión pueden tomar. La formulación de dicho modelo requirió la definición de parámetros para cuantificar los coeficientes de las ecuaciones lineales, la estimación de dichos coeficientes con base en datos históricos, muestreos y/o consultas bibliográficas también hizo parte fundamental de éste trabajo.

En el capítulo 4 se analizan los resultados de las corridas del modelo de programación lineal para cada una de las dos líneas de producción de Cerro Matoso S.A. Teniendo en cuenta que la relación Fe/Ni en el mineral y por ende en la calcina es una variable de alta incidencia en los resultados del modelo, se realizan corridas independientes a relación Fe/Ni en calcina de 8, 9 y 10 para cada una de las dos líneas. Una mayor relación Fe/Ni tiende a reducir el %Ni en el FeNi y a incrementar las pérdidas de Ni en la escoria, además de generar un mayor consumo de carbón, la combinación de estos movimientos hace que la utilidad definida para el proceso calcinación-fundición tienda a disminuir con el incremento de relación Fe/Ni, de ahí la importancia de generar valores de referencia para el consumo unitario óptimo de carbón.

En el capítulo 5 se resumen las conclusiones más importantes como el mayor consumo unitario óptimo de carbón de línea 2 con respecto a línea 1 a la misma relación Fe/Ni en calcina, lo cual es bien sabido el personal de proceso, pero que la modelación y optimización confirmó de manera consistente. Otra importante conclusión es que no se deben mirar las variables implicadas (%Ni en escoria y %Ni en metal por ejemplo) de forma aislada

cuando se definan sus valores o rangos de control, como se ha hecho históricamente, ya que son interdependientes, por tanto fijar una variable de manera arbitraria puede afectar negativamente la utilidad del proceso que es últimas lo que se debe maximizar. En cuanto a líneas futuras de trabajo la los modelo utilizados se pueden seguir actualizando para definir los consumos óptimos de carbón para minerales con contenidos de Ni y relaciones Fe/Ni y en calcina y mineral diferentes los evaluados en éste trabajo y de acuerdo a al plan de mina a mediano y largo plazo de Cerro Matoso S.A.

Es importante resaltar el impacto de implementar éste modelo en el proceso productivo de CMSA, ya que suministra a los ingenieros de proceso, supervisores y operadores una herramienta que les permite calcular el consumo de carbón que maximiza la utilidad del proceso integrado calcinación- fundición, en la actualidad se opera el control de adición de carbón con ciertas heurísticas y de manera reactiva de acuerdo a los resultados de %Ni en la escoria que el laboratorio de análisis químico suministra para cada apertura de escoria.

Capítulo 1. La Empresa.

Descripción general de la empresa Cerro Matoso S.A

Cerro Matoso S.A. (CMSA), se encuentra ubicado en la costa norte de Colombia, en la jurisdicción del municipio de Montelíbano (a 22km de la cabecera municipal), en el sur del departamento de Córdoba²

Montelíbano es un municipio con una población de 87.000 habitantes y una temperatura promedio de 28 °C, el área urbana se encuentra en la zona de vida del bosque húmedo tropical. Además la humedad relativa es del 78 % en tiempo de sequía y de 81 % en períodos de lluvia.



Figura 7.1 Visita Satelital CMSA

Fuente: Archivos CMSA

Cerro Matoso S.A es una operación del recién conformado grupo South 32, el cual surge como resultado de la escisión de negocios de BHP Billiton en 2015, con el objetivo de diversificar y agrupar con mayor eficacia las diferentes operaciones. South 32 es un grupo

² CERRO MATOSO S.A, Seccion 3000 Producción de FeNi.doc

que compite en los mercados de materias primas como bauxita, alúmina, aluminio, carbón, manganeso, níquel, plata, plomo y zinc, con operaciones ubicadas en Australia, sur de África y Colombia (CMSA).

Vision, misión, política y valores de Cerro Matoso S.A.

Vision: Ser líder mundial en el negocio de Níquel laterítico y ejemplo de gestión integral en La industria minera³

Mision: Crear Valor por medio de:

Las personas y el sistema gerencial: Fortaleciendo la cultura Cerro Matoso, promoviendo la creatividad, la innovación y el uso del Sistema Gerencial en nuestra gente.

Los recursos y las reservas: Encontrando recursos minerales y desarrollando las reservas eficientemente.

El mejoramiento continuo: Garantizando la producción, asegurando la calidad y el mejoramiento continuo de nuestros procesos.

El desarrollo sostenible: Contribuyendo al desarrollo sostenible de la región y con orgullo de nuestro legado.

Política de gestión integral: Cerro Matoso S.A. ha considerado siempre como parte integral de su operación minero-metalúrgica. La salud ocupacional, la seguridad industrial, el cuidado del ambiente, las responsabilidades con la comunidad, la satisfacción de los clientes, el respeto por los derechos humanos y la eficiencia energética³.

³ CERRO MATOSO S.A., Sistema de Gestión Integral

Para asegurar el cumplimiento de esta política, como parte del mejoramiento continuo y para lograr una posición más competitiva en el mercado mundial del ferroníquel, Cerro Matoso S.A. se compromete a:

- Operar cumpliendo la legislación, los compromisos adquiridos con terceros y todos los requisitos que le apliquen.
- Actuar de acuerdo con la carta de valores y el código de conducta de la organización.
- Gestionar los riesgos e impactos asociados a las actividades, procesos, activos y planes de negocio de la empresa.
- Respetar los derechos humanos y promoverlos con las partes interesadas.
- Satisfacer los requerimientos de los clientes.
- Utilizar eficientemente los recursos naturales y los recursos energéticos.
- Trabajar con las personas involucradas a lo largo de los ciclos de vida de los productos y subproductos para fomentar su uso y manejo responsable.
- Contribuir con el mejoramiento de la calidad de vida en el área de influencia y el desarrollo sostenible de la región.
- Apoyar la adquisición de productos y servicios energéticamente eficientes y mejorar continuamente el desempeño energético.

Cultura de Cerro Matoso S.A.

La compañía South32, propietaria de CMSA promulga los siguientes valores como base de las relaciones con todas las partes interesadas⁴.

Confianza: cumplimos nuestros objetivos y confiamos en que cada uno hace lo correcto

⁴ <https://south32.sharepoint.com/inside/Default.aspx?apr=1&wa=wsignin1.0>

Excelencia: actuamos con coraje y nos retamos a ser los mejores en cosas que realmente importan. Unidad: valoramos las diferencias y compartimos sabiendo que juntos somos mejores

Cuidado: cuidamos la gente, las comunidades de las cuales somos parte y del mundo del cual dependemos.

Para el cumplimiento de sus objetivos tiene incorporado el proceso de mejoramiento de situaciones basado en el ciclo PHVA, lo que permite analizar las situaciones identificando y priorizando los problemas, generar y ejecutar planes de acción que luego son verificados y normalizados.

Descripción de la operación de Cerro Matoso S.A.

Cerro Matoso S.A es una operación minero-metalúrgica de mineral de níquel laterítico, con explotación a cielo abierto y cuya operación inicio en 1982, con una capacidad instalada de producción de 36000 toneladas de níquel anuales⁵.

En la actualidad, CMSA está dividida en unidades de negocio operativas, administrativas, financieras y técnicas, las unidades de negocio operativas actualmente en CMSA son:

- U.N. de Mina: Encargada de la explotación del mineral del yacimiento.
- U.N. de producción planta: Encargada de las operaciones trituración, secado, clasificación, calcinación, fundición, refinación, empaque.
- U.N. de mantenimiento: Encargada de reestablecer la funcionalidad de los equipos utilizados en el proceso productivo.

⁵ CERRO MATOSO S.A., Sección 3000 Producción de FeNi.doc

- U.N. Servicio de operaciones: Administración de contratos que soportan la operación como: mantenimiento aire acondicionado, mantenimiento alumbrado, mantenimiento compresores y ascensores y mantenimiento predictivo equipos de planta.

La materia prima para el Proceso de Producción de Ferroníquel es extraída del yacimiento de mineral laterítico, su cliente es el Proceso de Ventas y Comercialización, el cual se encarga de entregarlo a la industria Metalúrgica del mercado mundial.

Red de Procesos

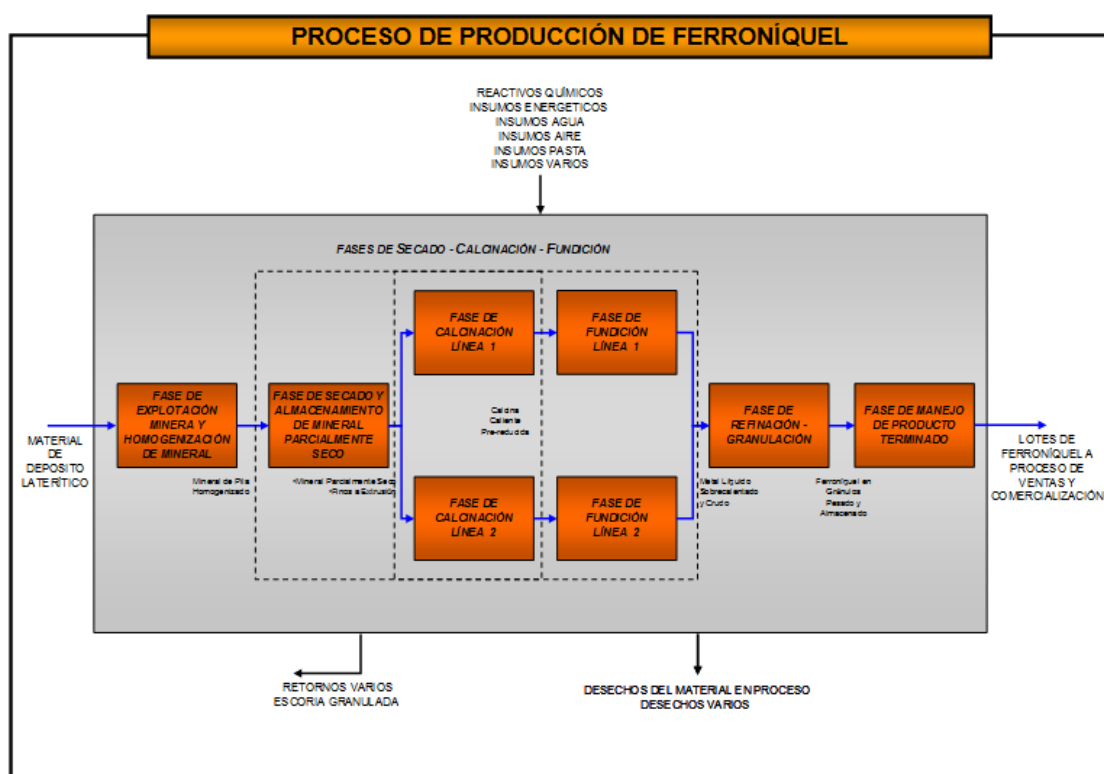


Figura 1.8 Diagrama de fases proceso de producción de FeNi

Fuente: Archivo CMSA

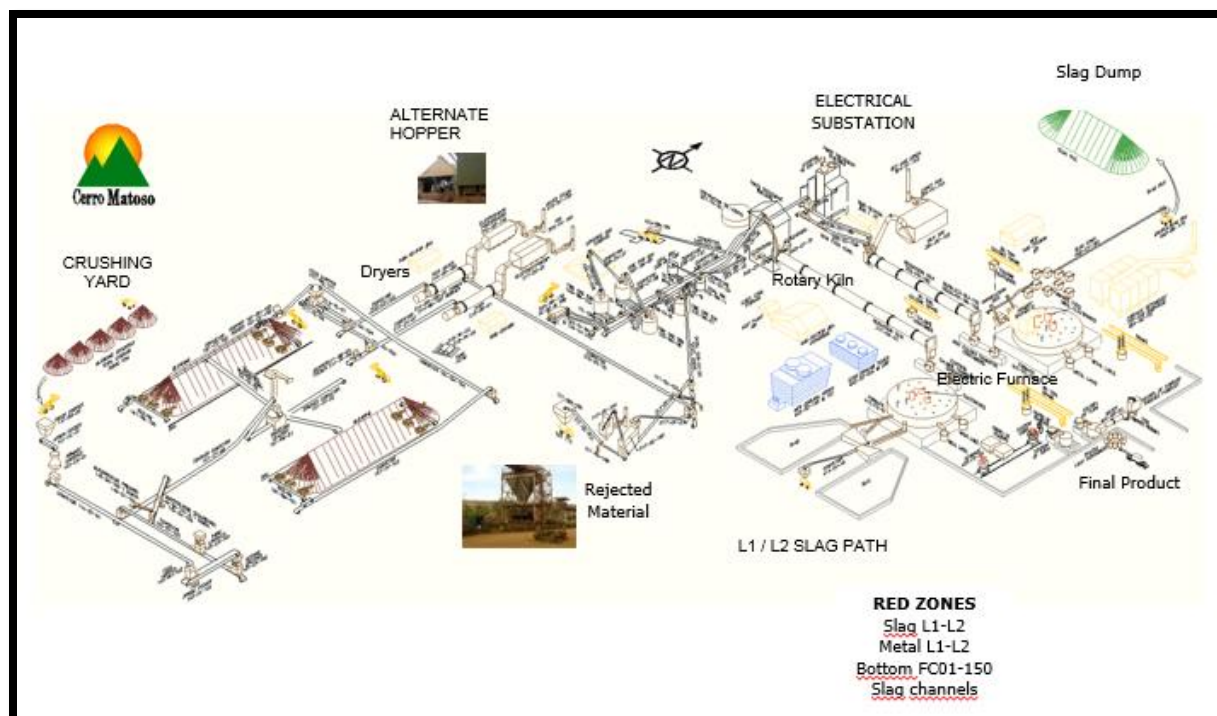


Figura 1.9 Distribución de equipos en proceso de producción de FeNi en CMSA

Fuente: Archivo CMSA

Planteamiento del problema

La empresa Cerro Matoso S.A. para su proceso de producción de ferro-níquel tiene dos líneas de producción y cada línea tiene dos equipos principales, el horno rotativo (calcinador o Rotary Kiln) y un horno eléctrico (Electric Furnace) conectado a 75MW, a su vez el proceso se delimita por fases así: la fase de pre reducción que está asociada a las transformaciones del mineral en el calcinador y la fase de fundición está asociada a las transformaciones del mineral calcinado en el horno eléctrico.

El mineral alimentado al calcinador, a una razón de 175 Ton secas/h, requiere una dosis de carbón para conseguir que:

1. El carbono y el monóxido de carbono reaccionen con los óxidos de Fe y Ni, y se presente el fenómeno de la pre reducción cuando la carga sólida alcanza temperaturas alrededor de 800-900 grados °C;
2. En el horno eléctrico finalicen las reacciones de reducción de Fe y Ni priorizando la selectividad hacia el níquel y minimizando la inevitable reducción del Fe hasta Fe metálico, esto último ocurre de forma excesiva cuando el contenido de carbono en la calcina que se alimenta es demasiado alto.

Por lo anteriormente expuesto el consumo unitario de carbón por tonelada de mineral seco es una variable clave para el proceso ya que su magnitud sumada al perfil de temperatura del calcinador afecta los siguientes parámetros de operación:

- Perdidas de Ni en la escoria en el horno eléctrico.
- Sobrecostos por consumo excesivo de carbón.

- Contenido de Fe en la escoria como FeO, esto afecta la viscosidad de la escoria que se extrae del horno eléctrico.
- %Ni en el metal que se extrae del horno eléctrico.

Actualmente el método de estimación de la dosis de carbón adecuada se hace de la siguiente manera:

$$C_{total} = 0.16394 \times \%Fe \times MC + 0.1996 \times \%Ni \times MC$$

Donde

C_{total}: es el carbono elemental requerido total en ton/h utilizando la estequiometria de las reacciones de calcinación-fundición. Se asume una recuperación de Ni de 92.8% y una recuperación de Fe de 26.3%.

MC: es la carga de alimentación del calcinador en ton secas/hora

La alimentación de carbón en ton/h se calcula conociendo el tonelaje de carbono elemental y dividiendo por el % carbono fijo del carbón (%C_{fijo}), y se corrige teniendo en cuenta dos factores de corrección de la siguiente manera:

$$\text{Carbón total seco (TPH)} = \frac{C_{total} \times FC \times FP \times (100\% - \%Hum \text{ residual Carbón})}{\%C_{fijo}}$$

Donde:

%C_{fijo}: %Carbono fijo que es relación entre C_{fijo}/carbón húmedo expresado como porcentaje.

FC: Factor de carbón. Es un parámetro que se utiliza para corregir la influencia de la atmósfera reductora (CO/CO₂) en los requerimientos de carbono, su rango típico es 0.8-0.9 dependiendo del poder reductor de los gases de la llama del calcinador.

FP: Factor de proceso. Es un factor empírico cuyo valor ideal es 1.0 y se debe ajustar en el rango 0.9 a 1.2 para poner en control %Ni y %Fe en la escoria de acuerdo a los resultados de proceso suministrados por el laboratorio.

%Hum residual Carbón: %Humedad residual del carbón en patio determinado por el laboratorio de análisis químico de CMSA. Se realiza el análisis hasta peso constante a una temperatura de secado de 105°C.

El modelo actual de control de dosis de carbón presenta el siguiente universo de oportunidades de mejora:

1. Solo tiene en cuenta la carga de alimentación del calcinador, contenido de Ni y Fe en el mineral alimentado, recuperaciones objetivo de Ni y Fe, no tiene en cuenta %Fe en escoria, ni %Ni en metal, los cuales son restricciones para el desempeño del proceso relacionadas directamente con la dosis de carbón utilizada.
2. El ajuste por retroalimentación (feedback) de la dosis de carbón, se hace verificando los resultados de %Ni y %Fe en la escoria del horno eléctrico, si %Ni es muy alto y/o %Fe es muy alto, entonces se incrementa la dosis aumentando el factor de proceso. El otro caso, si %Fe es muy bajo en la escoria, tanto como para no permitir su evacuación del horno eléctrico (mayor %Fe reduce la viscosidad de la escoria), pero %Ni está en control, entonces se reduce el factor de proceso y por ende la dosis de carbón.

3. No se tiene en cuenta %C en la calcina para realizar ajustes en el factor de proceso, porque los operadores no saben cómo relacionar ésta variable con las pérdidas de Ni en escoria y no tienen valores de referencia para ésta importante variable que es la que cuantifica el carbono que se alimenta al horno eléctrico.
4. Se buscan valores objetivo fijos de %Ni en escoria para minimizar pérdidas no recuperables de Ni, no se tiene en cuenta de forma estandarizada y sistemática que al ajustar la dosis de carbón se afectan también por ejemplo %Fe en escoria, %Ni en metal.

Las debilidades del modelo actual para definir la dosis de carbón se manifiestan por medio de los siguientes signos y síntomas.

1. Pérdida de tiempo por Retención de escoria: Cuando el operador incrementa el factor de proceso y por ende la dosis de carbón, con el único objetivo de reducir las pérdidas de Ni en escoria puede llegar a reducir tanto el %Fe en la escoria al punto de que su alta viscosidad no permite su evacuación continua, ocasionando paradas no planeadas del calcinador.

En lo que va del año financiero FY16 (Julio 2015-Junio de 2016) para la línea 1 (L1) el calcinador ha tenido 35.2 horas de paradas no programadas por dificultades para evacuar la escoria debido al bajo %Fe. La siguiente grafica corresponde al Pareto de toneladas de Ni no producidas en lo corrido del FY16 (Julio 2015-Junio 2016), se resalta en un rectángulo la barra correspondiente a retención de escoria con un total de 193 ton Ni.

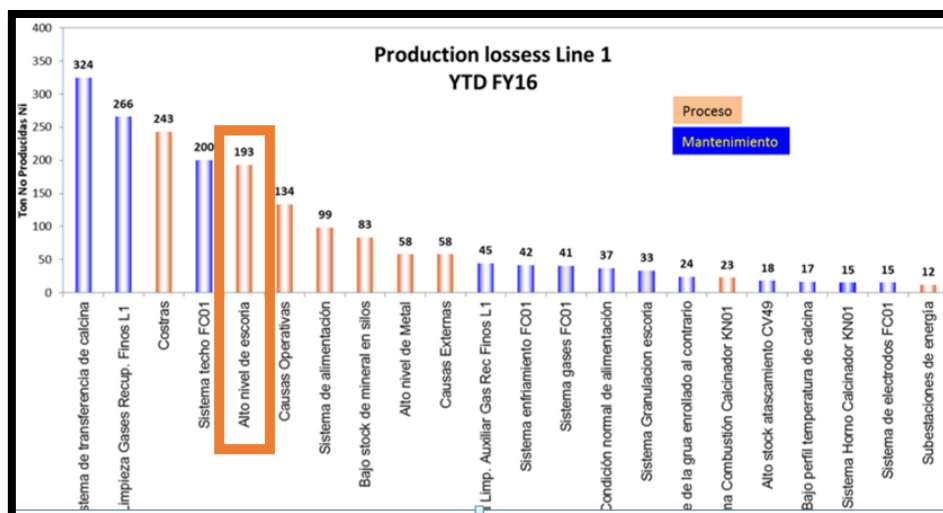


Figura 1.4 Pareto ton no producidas de Ni en FY16

Fuente: Archivos de CMSA

En la siguiente grafica se observa la relacion entre la viscosidad y el contenido de hierro en la escoria, a menor contenido de FeO mayor es la viscosidad.

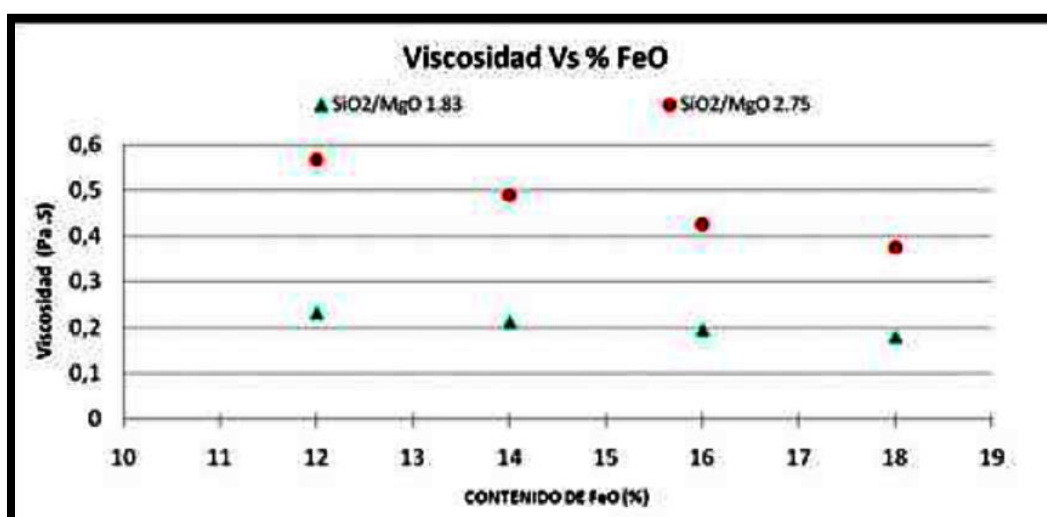


Figura 1.5 Relación contenido viscosidad/FeO

Fuente: Elaboración propia

2. Bajo %Ni en metal: Cuando el operador incrementa el factor de proceso y por ende la dosis de carbón, con el único objetivo de reducir las pérdidas de Ni en escoria puede llegar a reducir %Ni en el metal por debajo del nivel mínimo exigido por marketing para comercializar el producto, también se impacta la carga de alimentación a Refinería, ya que a menor %Ni en metal mayor debe ser el número de coladas para cumplir con el plan de producción el cual esta expresado en términos de Ton Níquel y no de FeNi.

En la siguiente grafica se observa el efecto del consumo de carbón sobre el %Ni en el metal, a mayor consumo unitario de carbón es menor el %Ni en el metal.

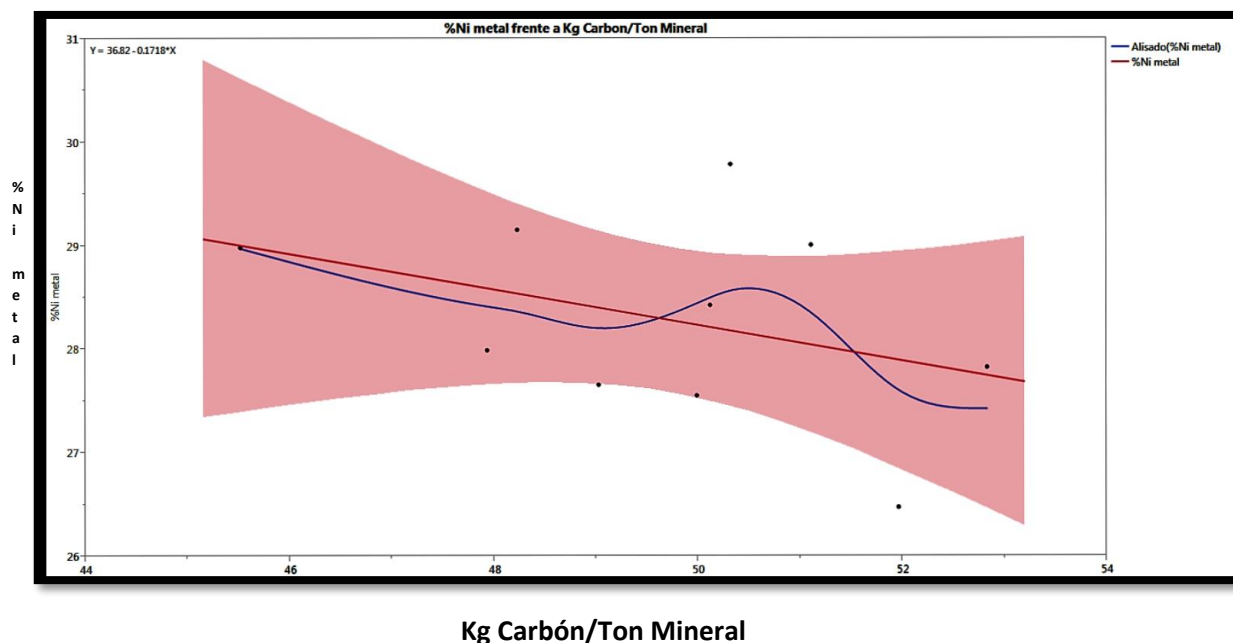


Figura 1.6 Relación (%Ni metal) Vrs (Kg Carbón/Ton mineral)

Fuente: Elaboración propia

3. Alto consumo unitario de carbón: El perfil de temperatura del calcinador en la fase mineral, afecta ostensiblemente el desempeño de las reducciones de Ni y Fe, cuando el calcinador no tiene un nivel de temperatura adecuado el operador tiende a compensar las bajas reducciones de Ni (altas pérdidas de Ni en escoria) adicionando más carbón, es decir incrementando el factor de proceso y por ende la dosis de carbón. Esto finalmente se traduce en sobre costo por consumo excesivo de carbón, cuando en realidad lo que se debe hacer es incrementar la temperatura en el calcinador.

En los meses de abril y mayo de 2015 (FY15) un primer ejercicio de optimización fue realizado en la L1, obteniendo los siguientes resultados de parámetros óptimos para ese ejercicio:

X1	X2	X3	X4	X5
Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria
50,72	1,78	28,99	0,15	10,60

Tabla 1.1 Optimización L1

Fuente: Elaboración propia

La gráfica debajo muestra el consumo unitario de carbón vs las pérdidas de %Ni en escoria (pérdidas). A partir del mes de 2015 (FY16) se observa la reducción de consumo de carbón, luego de un primer ejercicio de optimización en la línea 1. Observe la reducción del consumo de carbón a partir del mes de Junio de 2015 (FY16), pasando de 57.02Kg/Ton Min promedio en FY15 a 49.85Kg/Ton Min promedio en FY16 (versus 50.72Kg/Ton Min del modelo optimizado), ese cambio conllevó a un mínimo incremento de pérdidas de Ni en escoria de 0.130% a 0.145% (versus 0.150% del modelo optimizado).

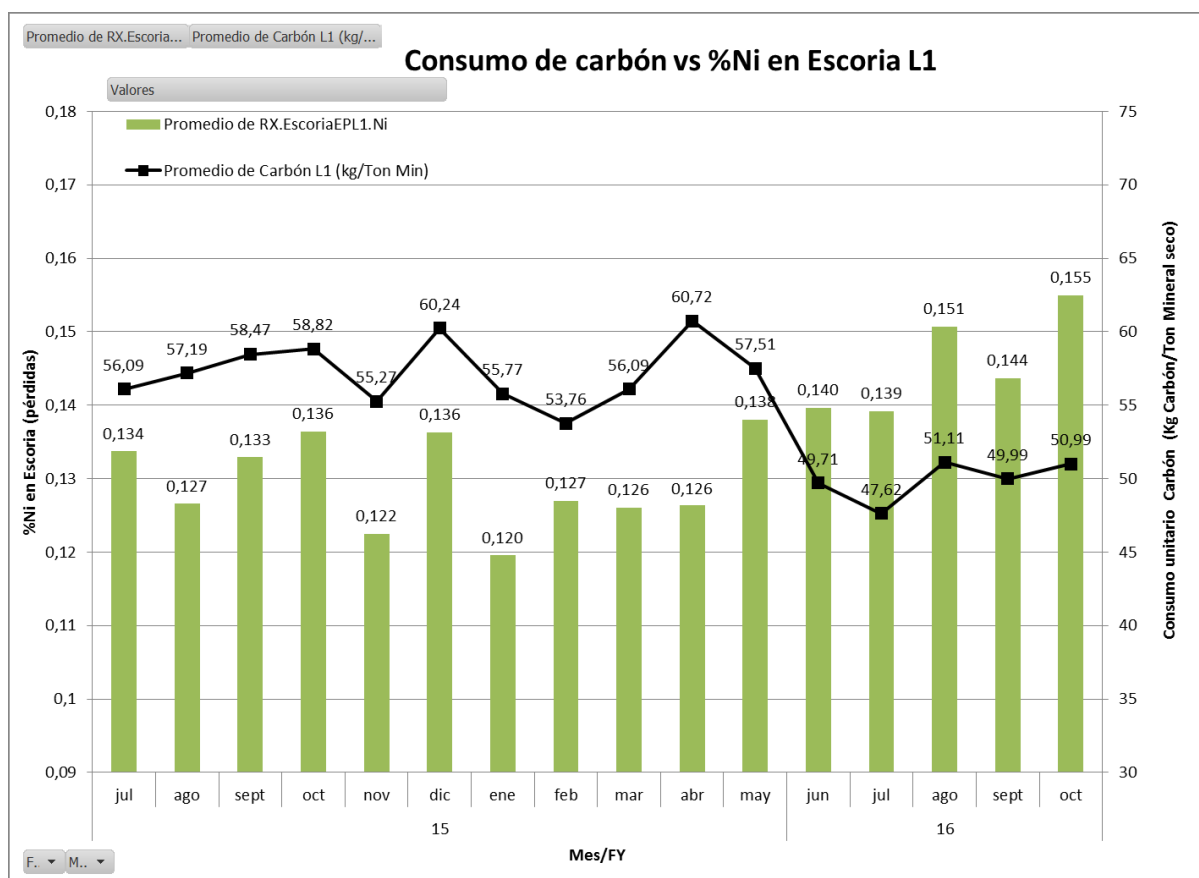


Figura 1.7 Consumo de Carbón Vrs % de Ni en Escoria L1

Fuente: elaboración propia

Estos datos demuestran que hay potencial de ahorro en consumo unitario de carbón sin elevar excesivamente la pérdidas de Ni en escoria y maximizando la utilidad del proceso RKEF.

Los anteriores signos y síntomas nos invitan a generar la siguiente pregunta problema:

“Cuál sería el modelo de optimización del consumo unitario de carbón del proceso RKEF en Cerro Matoso S.A.?”

Y la anterior pregunta problema invita a generar las siguientes sub preguntas:

1. ¿Existirá un modelo que optimice los parámetros de consumo de la cantidad de carbón por cada tonelada de mineral de níquel?
2. ¿Cuáles serían los parámetros relacionados con el consumo de carbón unitario para maximizar la utilidad en el proceso RKEF de producción de ferroníquel?
3. ¿Cuáles serían las variables críticas de operación que determinan el consumo óptimo de carbón que ingresa al sistema?
4. ¿Cuáles son las variables que impactan la función objetivo del modelo de optimización?
5. ¿Cuál es el conjunto de restricciones que determinan el modelo óptimo del consumo de carbón?

Objetivos

Objetivo General

Definir un modelo para estimar el consumo unitario de carbón que maximice el beneficio económico en la fase de calcinación-fundición del proceso de producción de ferro níquel en la empresa Cerro Matoso S. A.

Objetivos Específicos:

1. Correlacionar estadísticamente las variables de proceso de la función objetivo con el consumo unitario de carbón.
2. Correlacionar estadísticamente relación Fe/Ni de la pila de mineral con la relación Fe/Ni de la calcina alimentada a los hornos eléctricos.
3. Construir el modelo y generar curvas predictivas de consumo unitario de carbón óptimo de acuerdo al valor de la relación Fe/Ni de la pila en consumo.
4. Establecer los valores esperados de %C en calcina, %Ni en metal, %Ni en escoria y %Fe en escoria correspondientes al consumo unitario de carbón óptimo.
5. Validar el modelo comparando los valores obtenidos para las variables de decisión en la optimización contra los valores reales históricos del periodo analizado (FY16) y estimando el porcentaje de mejora en la función objetivo (utilidad) para cada corrida (línea 1, 2 y relación Fe/Ni=8, 9, 10)

Metodología

El método CAP-Do es utilizado en la empresa Cerro Matoso S.A. como parte del sistema de gestión de la calidad en el proceso de mejora continua, se usó para construir el modelo que permita encontrar los valores estimados óptimos del consumo unitario de carbón del proceso RKEF. El ciclo consta de las siguientes etapas: chequear, analizar, planificar y ejecutar⁶.

⁶ <http://es.slideshare.net/lmarcela74/mejora-35260262>

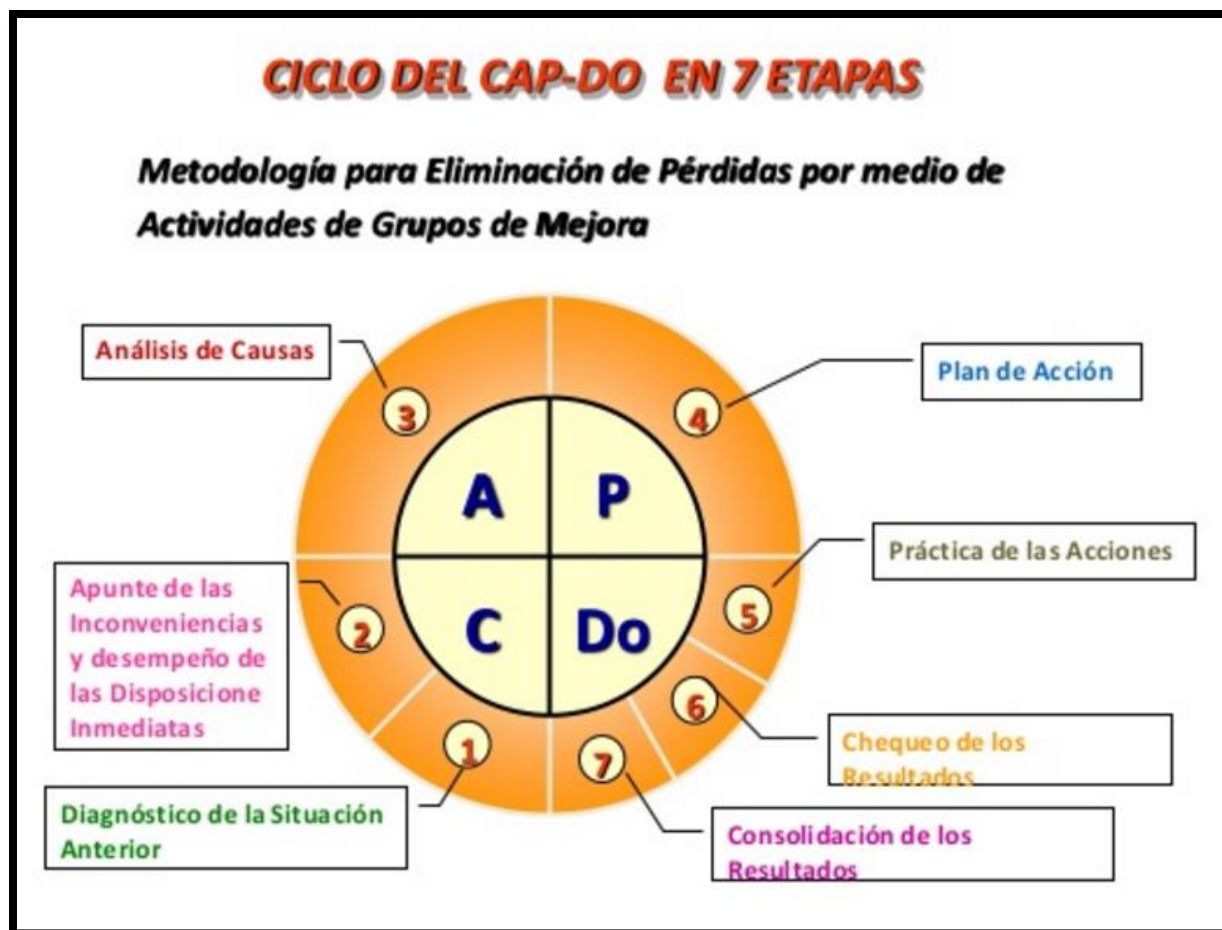


Figura 1.8 Ciclo CAP-DO

Fuente: <http://es.slideshare.net/lmarcela74/mejora-35260262>

Las acciones ejecutadas de acuerdo al método CAP-DO desarrolladas en el proyecto se observa en la siguiente tabla.

CHEQUEAR	ANALIZAR	PLANIFICAR	EJECUTAR
<ul style="list-style-type: none"> • Análisis del método actual • Consulta de manuales de operación y diseño de calcinadores • Identificar las variables relacionadas con el problema • Consultar información histórica 	<ul style="list-style-type: none"> • Se realiza tabulación de la información histórica consultada • Se realiza análisis de la forma como se relacionan las variables involucradas 	<ul style="list-style-type: none"> • Se planean las actividades concernientes a la elaboración del modelo, definiendo los parámetros indicados para su ejecución 	<ul style="list-style-type: none"> • Se determino el % de conversión de carbón en cada calcinador • Se determino el % de Ni en las escorias para cada línea de operación • Se determino el % de Fe metálico en las escorias para cada línea de operación • Se correlacionaron la relación Fe/Ni en pila con la relación Fe/Ni de calcina • Se estableció las regresiones lineales entre %NiO en la escoria y %C en la calcina en cada una de las líneas. • Establecer las regresiones lineales entre %FeO en la escoria y %C en la calcina en cada de las líneas. • Formulación del problema de programación lineal en el siguiente orden: definir las variables de decisión, función objetivo, restricciones del problema y de no negatividad. • Resolución del modelo para los diferentes casos de relación Fe/Ni en el mineral (6,7,8,9,10) • Análisis de resultados y ajuste del modelo

Tabla 1.1 Listado de acciones ejecutadas en cada Fase del Proyecto

Alcance y limitaciones

El alcance del proyecto se define por la siguiente tabla donde se define que es el proyecto y que no es.

QUE ES	QUE NO ES
Proyecto para estimar del porcentaje unitario de carbón en el proceso de producción de CMSA	Proyecto de estimación del porcentaje unitario de hierro o níquel en el proceso de producción de CMSA
Modelo de estimación del porcentaje unitario de carbón para la empresa Cerro Matoso S.A	Modelo de estimación del porcentaje unitario de carbón para empresa diferente a Cerro Matoso S.A

Tabla 1.2 Delimitación del proyecto

El proyecto tiene las siguientes limitaciones:

Limitaciones de tiempo, este se desarrolla en el año 2016 como requisito para obtener el título de maestría en ingeniería administrativa en la universidad del Norte de Barranquilla

Limitaciones de espacio, este se desarrolla en las instalaciones de Cerro Matoso S.A

Limitaciones de condiciones físicas del mineral a analizar, dentro del desarrollo no se tiene en cuenta las variables asociadas a temperatura de calcina debido a la complejidad del manejo de esta restricción dentro del modelo.

Capítulo 2:

Marco Teórico

Para formular el proyecto de investigación acerca de la construcción de un modelo de programación lineal para optimizar el consumo unitario de carbón en el proceso RKEF de Cerro Matoso S.A. se consultaron fuentes relacionadas con dos temas generales:

1. Proceso RKEF (*Rotary Kiln-Electric Furnace*) para producción de ferróníquel a partir de mineral laterítico
2. Método CAP-DO para construcción de un modelo de programación lineal

En cuanto al primer tema se consultó información relacionada con los fundamentos del proceso RKEF, las reacciones químicas involucradas en las etapas de calcinación y fundición, la influencia de la dosis de carbón en el desempeño del proceso, análisis comparativos del desempeño para operaciones diferentes a Cerro Matoso S.A. que también producen FeNi, manuales de entrenamiento de la operación del proceso RKEF de Cerro Matoso S.A., fundamentos de tecnología del carbón.

La segunda gran temática consultada fue la metodología para la construcción de un modelo de programación lineal, específicamente el método CAP-DO (*check, analyze, plan, do*) por su alineamiento con el ciclo de la calidad PHVA y la simplicidad de sus pasos para construir un modelo coherente y útil.

La temática 1 fue la más extensa y de más amplia búsqueda de información, éste proyecto de optimización inició como una asignación real de ingeniería de proceso en Mayo de 2015, por lo que fue necesario leer artículos y capítulos de libros especializados y armar una base

conceptual robusta para proponer una solución. La metodología utilizada para buscar fuentes relevantes fue la siguiente:

- Búsqueda en portales de ciencias e ingeniería
- Lectura del *abstract* o resumen ejecutivo
- Comparación de la información consultada con la idea base del proyecto, la existencia de una dosis de carbón óptima para el desempeño del proceso RKEF.
- Incorporación o no del artículo o documento a la bibliografía del proyecto.

La clasificación de las fuentes se hizo por tema general (proceso RKEF o construcción de un modelo de programación lineal) y luego por tema específico, lo cual aplica principalmente para la temática del Proceso RKEF por ser el más amplio y de mayor complejidad. Las categorías de temas específicos utilizadas son:

- Fundamentos del proceso RKEF:
 - Handbook of Ferroalloys, Chapter 5 Dewatering and Calcination of Laterite Ores, Michael Gasik, 1st edition, 2013.
 - Handbook of Ferroalloys, Chapter 10 Technology of Ferronickel, Michael Gasik, 1st edition, 2013.
 - Handbook of Ferroalloys, Chapter 6 Smelting of Laterite Ores to Ferronickel, Michael Gasik, 1st edition, 2013.
 - Mechanical slag losses in laterite smelting –Nickel-, M.Y. Solar, Pyrometallurgy of Nickel and Cobalt 2009

- Selection of optimum ferronickel grade for smelting nickel laterites, M.Y. Solar, independent consultant, Oakville, Ontario; I. Candy and B. Wasmund, Hatch, Mississauga, Ontario.
- Efecto de la dosis de carbón en el desempeño del proceso RKEF:
 - Selection of optimum ferronickel grade for smelting nickel laterites, M.Y. Solar, independent consultant, Oakville, Ontario; I. Candy and B. Wasmund, Hatch, Mississauga, Ontario.
 - Understanding ferronickel smelting from laterites through computational thermodynamics modelling, D. R. Swinbourne.
- Comparación del desempeño del proceso RKEF para diferentes operaciones:
 - JOM World Nonferrous Smelter Survey, Part III: Nickel: Laterite, A.E.M. Warner, C.M. Díaz, A.D. Dalvi, P.J. Mackey, and A.V. Tarasov.
- Tecnología del carbón: Carbón, profesor Dr Vicente J. Cortés.

Para el método de programación lineal se utiliza una sola categoría:

- Método CAP-DO para construcción de un modelo de programación lineal:
 - ingeniería industrial Modelación lineal en: Una mirada sistémica, Capítulo 2 Modelo de Programación Lineal (MPL), Jorge Iván Pérez Rave, 2011.

Con base en la revisión de las fuentes técnicas del proceso RKEF y el análisis de los datos históricos de proceso de Cerro Matoso S.A. se puede concluir que existe un compromiso (*trade off*) entre las variables dosis de carbón, %Ni en metal, %Ni en escoria y %Fe en la escoria, lo

cual sugiere la existencia de valores óptimos de consumo unitario de carbón cuando se toma la utilidad del proceso RKEF como función objetivo a maximizar, sujeta a ciertas restricciones que condicionan la estabilidad del proceso y la calidad del producto final FeNi.

Marco Conceptual

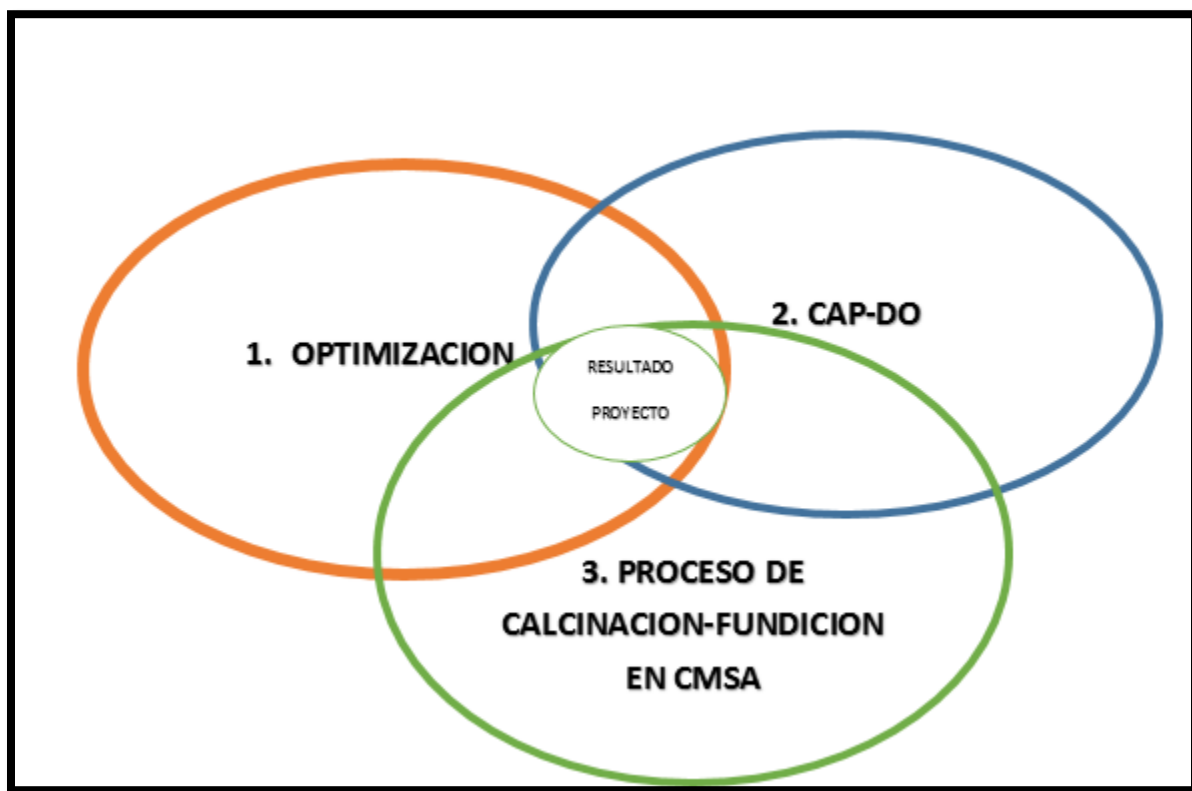


Figura 2.1 MODELO CONCEPTUAL

Fuente: elaboración propia

Para desarrollar el marco conceptual de este proyecto se integran los universos de conocimientos de: formulación de modelos lineales como método de optimización, la metodología de gestión CAP-DO y las fases de calcinación fundición el proceso de producción de ferroníquel en Cerro Matoso S.A, para dar como resultado un modelo que estima el consumo unitario óptimo para el carbón en el proceso de producción. A continuación se desarrolla la información teórica de cada uno de los universos de conocimiento integrados en este proyecto.

Optimizacion

La técnica de investigación de operaciones más importante es la programación lineal, diseñada para modelos con funciones objetivo y restricciones lineales, el cual mediante un algoritmo que se aplica de forma repetitiva al problema en cada iteración acerca a la solución a la óptima.

Para implementar la técnica de investigación de operaciones se desarrolla en las siguientes fases:

Definición del problema: Implica definir el alcance del problema investigado, describir las posibles alternativas de decisión, determinación del objetivo de estudio y especificar las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema modelado.

Construcción del modelo: según la complejidad del problema implica la transformación del problema en relaciones matemáticas en caso de programación lineal o métodos heurísticos o simulación de ser necesario

Solución del modelo: la solución implica el uso del algoritmo de optimización bien definido, a la cual se le aplica el análisis de sensibilidad que permite ver el comportamiento de la solución óptima en el entorno de los parámetros estimados

Validación del modelo: se comprueba si el modelo propuesto hace en realidad lo que dice que hace, si los resultados son intuitivamente aceptables en otras palabras el modelo es válido si en condiciones de entrada de datos iguales reproduce el desempeño pasado.

Implementación de la solución: La implementación implica la transformación de resultados en instrucciones de operación comprensibles que se emitirán a las personas que administran el sistema recomendado.

Existen varios métodos para la solución de problemas de programación lineal dentro de ellas está el método gráfico y el método simplex.

Método gráfico: este método comienza elaborando una gráfica que muestre las soluciones posibles (valores X_1 y X_2). La gráfica tendrá valores los valores X_1 en el eje horizontal y los valores X_2 en el eje vertical. El procedimiento para hallar la solución gráfica consiste en lo siguiente:

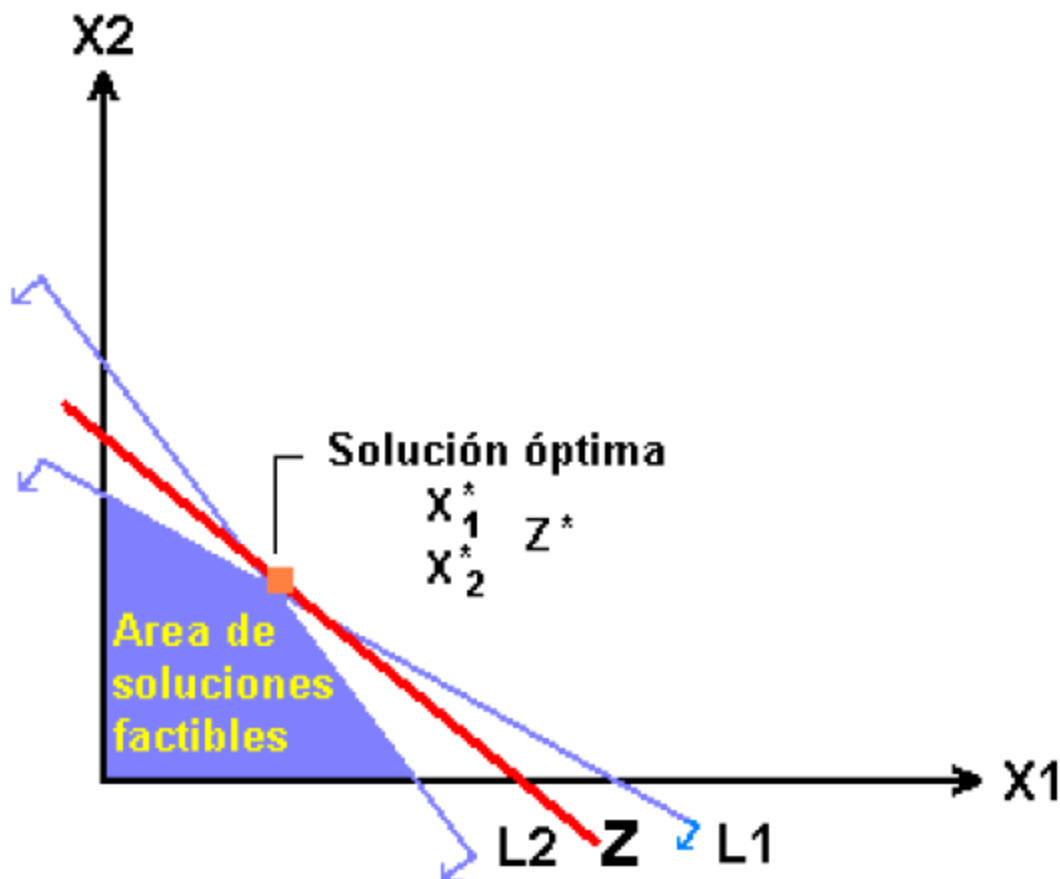


Figura 2.2 Método Grafico

Fuente: www.ganimides.ucm.cl/haraya/doc/m_grafico.pdf

Para cada inecuación del sistema de restricciones (medio espacio cerrado) se toma la recta correspondiente y se determinan los interceptos con la gráfica. Si la recta pasa por el origen del eje de coordenadas, el término independiente es cero, entonces se traza la recta tomando el origen y otro punto determinado dando un valor arbitrario a una de las variables⁷.

Para determinar los puntos que satisfacen cada inecuación se sustituye un punto cualquiera del espacio y de esta forma se determina si los puntos que satisfacen la misma están hacia el

⁷

www.ecured.cu/M%C3%A9todos_de_Soluci%C3%B3n_de_la_Programaci%C3%B3n_Lineal

Fuente:

lado que está el origen o hacia el lado contrario, señalando con una flecha ese lado. Cuando la recta pasa por el origen entonces se toma otro punto cualquiera pero que sean sencillos los valores de sus coordenadas, por ejemplo, $(0,1)$, $(1,0)$, $(1,1)$, etc, Luego se determina la región solución que es la región del plano que satisface todas las restricciones al mismo tiempo y que debe estar en el primer cuadrante. La figura formada es un poliedro convexo que tiene un conjunto de puntos extremos.

Se busca el punto óptimo entre el conjunto de puntos extremos. Para eso se sustituye cada par de puntos (X_1, X_2) de los puntos extremos en la función objetivo y se calcula el valor de Z . Si se está maximizando el valor de la misma, el punto óptimo será aquel que proporcione el valor mayor para Z y si el criterio de optimización es de minimizar, entonces el punto óptimo será aquel que proporcione el valor mínimo de Z ⁸

Metodo simplex: El método constituye una forma sistemática y de búsqueda intensiva a través de todas las posibles soluciones para obtener una solución óptima, resulta de gran utilidad debido a su eficiencia, es de fácil programarlo en una computadora. En contraste con el análisis gráfico, este método permite el uso de muchas variables como también permite la aplicación de cantidades de restricciones lineales con signos; mayores e igual, menores e igual y de igualdad.

Una propiedad del método simplex es que resuelve la programación lineal en interacciones, cada iteración desplaza la solución a un nuevo punto esquina que tiene

⁸ Gallagher, Charles A. Watson, Hugh J. Métodos Cuantitativos para la toma de decisiones. Pág. 156-166

potencial de mejora en el valor de la función objetivo, este procedimiento termina hasta cuando ya no se pueden obtener mejoras⁹.

Ciclo CAP-DO

El método CAP-DO se utilizó como referencia para desarrollar el modelo de forma estructurada, siguiendo cada uno de los pasos indicados en el texto fuente, corriendo el ciclo de mejoramiento continuado hasta conseguir resultados coherentes, factibles y que agreguen valor al proceso RKEF de Cerro Matoso S.A.



Figura 2.3 Ciclo CAP-DO

Fuente: <http://es.slideshare.net/kristhianbarragan/112-investigacin-at>

Los resultados de la implementación del ciclo le permiten a las organizaciones una mejora integral de la competitividad, luego cada proyecto u operación o iniciativa

⁹ Handu A Taha, Investigación de Operaciones. Pág. 71-77

desarrollada se puede controlar para tener una visión detallada de su estado, evaluarlo y buscar formas de mejorarlo.

Fase chequear: En esta fase se buscan todos los datos relativos al problema, se identifican las circunstancias en que ocurren los hechos determinando los fenómenos más importantes.

Fase analizar: Se evalúa el fenómeno para encontrar las causas raíces, usando la herramienta apropiada para auscultar en el problema, como correlaciones, tabulación de datos, diagramas de Pareto, diagrama de causa raíz entre otros.

Fase planear: En esta fase se organiza y programa la implementación de las soluciones, restauraciones y mejoras, con las actividades complementarias concernientes, se define el que, como, quien y cuando se desarrollan las actividades.

Fase hacer: en esta fase se ejecutan las acciones definidas en el proceso de planeación, teniendo el control que permita verificar la efectividad de cada acción.

Proceso de Calcinación y Reducción-Fusión

Cerro Matoso S.A. (CMSA) produce aleación FeNi por medio del proceso *DRKEF* (*Drying, Rotary Kiln and Electric Furnace*). En dicho proceso se adiciona carbón bituminoso al mineral parcialmente seco que se alimenta a los calcinadores, para que actúe como agente reductor de los óxidos de Ni y Fe que están presentes en el mineral a ser procesado por los calcinadores (*kilns*), siendo el carbono contenido en el carbón el principal componente de

éste reactivo, ya que es dicho elemento el que participa directamente en las reacciones químicas de reducción de Ni y Fe, las cuales ocurren primero en el calcinador (parcialmente) y luego se completan hasta el punto final en el horno eléctrico¹⁰.

Proceso de calcinación

Las reacciones que ocurren en el calcinador se resumen en la figura 2.4¹¹:

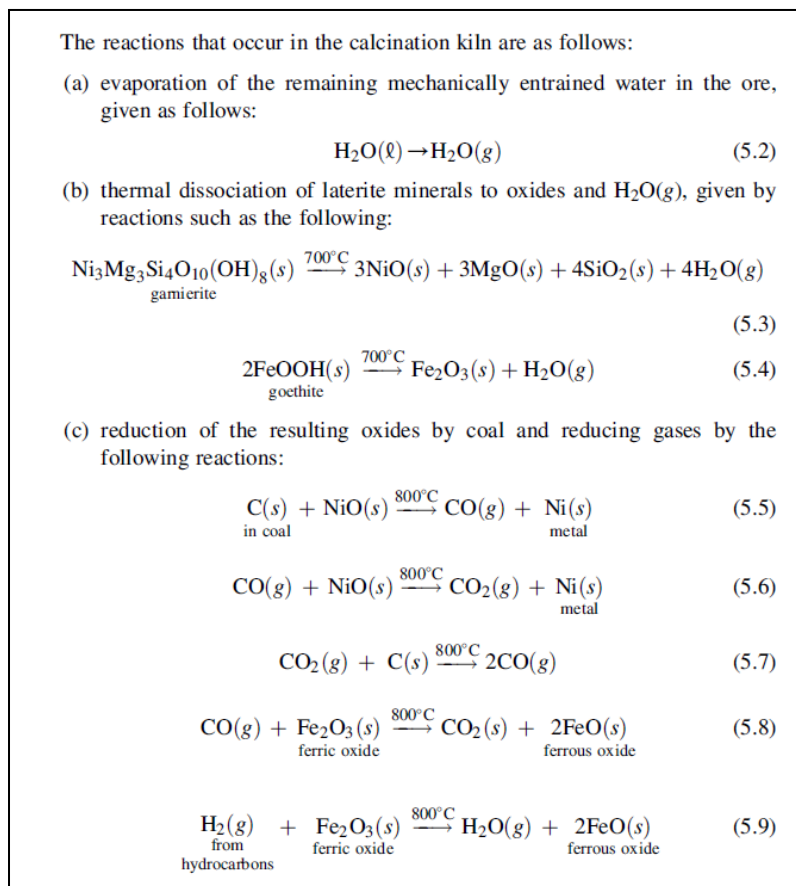


Figura 2.10 Reacciones químicas que ocurren en el calcinador

Fuente: Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition.

¹⁰ Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition.

¹¹ Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition.

En la fase de calcinación el mineral laterítico que ha sido sometido a secado parcial y clasificación para incrementar el %Ni (upgrading), es ahora procesado para remover completamente la humedad remanente en el mineral y remover parcialmente el oxígeno de los óxidos de Ni y Fe, es decir la reducción parcial del mineral.

Los objetivos de la etapa de calcinación son:

- Remover el agua remanente en el mineral parcialmente seco alimentado al calcinador, para evitar explosiones o presurizaciones en el horno eléctrico.
- Reducir cerca del 25% del Ni que se encuentra en el mineral como NiO a níquel metálico.
- Reducir la mayor parte del hierro férrico en el mineral a hierro ferroso y cerca del 5% del hierro a metal.
- Adicionar suficiente carbón en el calcinador de tal forma que el carbono residual en la calcina sea suficiente para completar las reacciones de reducción que se dan en el horno eléctrico.
- Suministrar calcina con temperatura tan alta como sea posible (800-900°C) hacia el horno eléctrico para minimizar el consumo de energía eléctrica.

La calcinación del níquel laterítico se desarrolla en calcinadores rotatorios (*Rotary Kilns*), con longitudes de hasta 185m y utilizan hidrocarburos como combustible, tienen inclinaciones típicas de 4% con respecto a la horizontal y rotan a 1 rpm aproximadamente¹².

El mineral seco y clasificado es alimentado continuamente por el extremo más alto del calcinador. Carbón es adicionado continuamente junto con los finos reciclados y peletizados

¹² CERRO MATOSO S.A., Sección 3000 Producción de FeNi.doc

provenientes del mismo u otro calcinador en paralelo. El carbón adicionado se encuentra en una dosis cercana al 5% del flujo de alimentación de mineral seco y clasificado alimentado. En el calcinador los materiales fluyen lentamente hacia abajo debido a la rotación del equipo y salen por el extremo caliente del mismo, es decir por el lado del quemador.

La mayoría de los calcinadores están provistos en su interior con levantadores, su función es mantener una cascada de mineral en contacto continuo con los gases calientes y reductores. Los calcinadores pueden estar equipados con ventiladores a bordo para introducir aire al interior del calcinador directamente y cucharas a bordo para adicionar carbón en la zona de reducción.

Niveles controlados de Ni, Fe y C en la calcina aseguran una producción eficiente de ferroníquel con una composición constante en el proceso de reducción y fusión.

Los productos de la fase calcinación son los siguientes:

- Gases de combustión que contienen finos, contienen principalmente CO₂, agua y N₂ a temperaturas en el rango 250-380°C.
- Mineral calcinado, seco, parcialmente reducido a una temperatura de 700-820°C

Proceso de Reducción y fusión

El producto de la etapa de calcinación, es el mineral calcinado o calcina, la cual contiene 1.5-3% Ni, del cual alrededor del 25% es Ni metálico y el resto como NiO, 12-15% Fe, el cual ocurre mayormente como óxido ferroso con una mínima cantidad de hierro en

forma metálica, y un contenido de carbono de 1-2%. Óxidos de magnesio y sílice también están presentes en la calcina¹³.

El proceso de reducción y fusión convierte la calcina en ferroníquel fundido que es conveniente para someterlo a refinación o su uso directo en la fabricación de acero inoxidable. La calcina es alimentada continuamente en el horno eléctrico donde es reducida y fundida para generar los siguientes productos:

- Ferroníquel fundido crudo (sin refinar) con una composición de 20-40% Ni, 80-60% Fe
- Escoria fundida a 1550°C, compuesta de SiO₂, MgO y FeO y 0.1 y 0.2% Ni
- Gases de salida a 900°C compuestos principalmente de CO y N₂.

Debido a que la escoria y el ferroníquel son inmiscibles, el ferroníquel por ser más denso se sedimenta en el fondo del baño del horno mientras la escoria se mantiene flotando en la superficie del baño (las densidades del FeNi y la escoria son aproximadamente 7Ton/m³ y 3Ton/m³ respectivamente). (Ver figura 2.5)

¹³ CERRO MATOSO S.A., Sección 3000 Manual de la subface reducción y fusion.doc

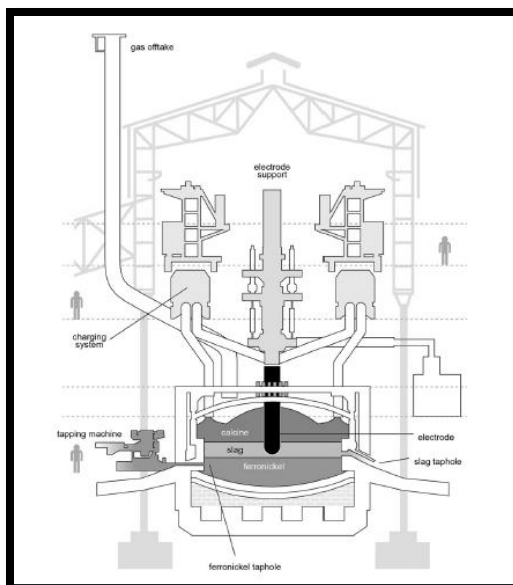


Figura 2.11 Esquema horno eléctrico para fundición de laterita en ferroníquel

Fuente: Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition

El FeNi fundido y la escoria son extraídos separadamente del horno eléctrico a través de piqueras a diferente altura. El ferroníquel fundido es extraído de forma intermitente hacia un crisol, el cual luego es transportado usando grúas hacia el proceso de refinación y granulación.

La escoria es extraída de forma más continua, granulada y dispuesta en botaderos, excepto en Japón donde es utilizada como material de construcción¹⁴.

Las reacciones que ocurren en el horno eléctrico se muestran en la figura 2.6:

¹⁴ Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition

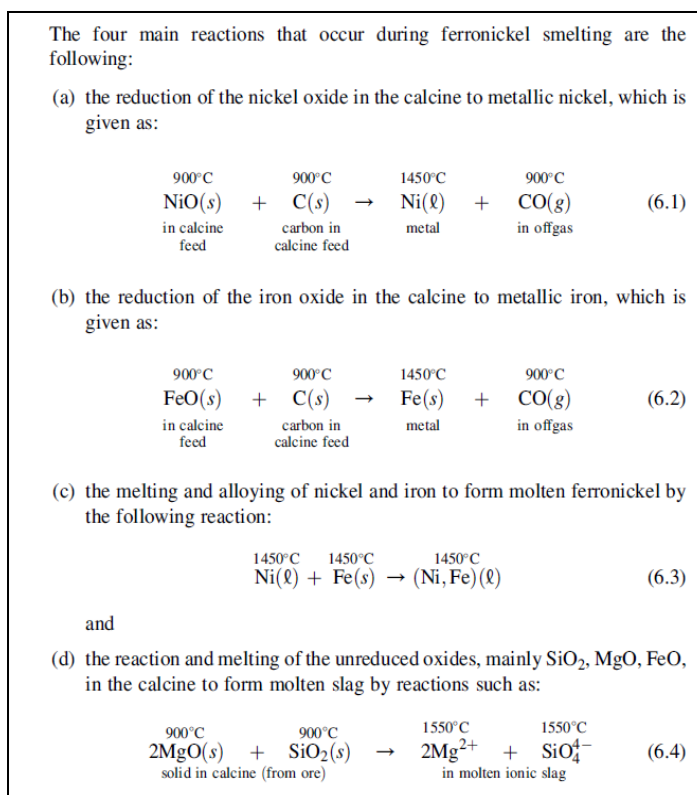


Figura 2.12. Reacciones químicas que ocurren en el horno eléctrico

Fuente: Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition

La dosis o consumo unitario de carbón por tonelada de mineral seco alimentado al calcinador es un **Driver** clave del proceso RKEF ya que dependiendo de la composición química del mineral (principalmente la relación %Fe/%Ni) y el desempeño del calcinador (perfil de temperatura de mineral a lo largo del sistema), éste parámetro define:

- Composición química de la escoria: %Ni representa pérdidas para el proceso y debe mantenerse tan bajo como sea posible, dichas pérdidas se presentan en dos formas, NiO y Ni^0 (níquel metálico). Alto contenido de NiO se debe a reducción deficiente en el calcinador (baja adición de carbón y/o baja temperatura de calcina) y el horno eléctrico (insuficiente %C residual en calcina), mientras que las pérdidas de Ni metálico son

netamente físicas o por arrastre, y se debe a que la separación de las fases escoria y metal fundidos dentro del horno eléctrico no es perfecta. El %Fe en la escoria es un parámetro de control importante para asegurar la evacuación adecuada de la escoria y mantener el horno eléctrico estable, si la escoria fundida no puede ser evacuada se genera el fenómeno conocido como ***retención de escoria*** que básicamente es el incremento del nivel de escoria ocasionando que la punta de los electrodos se acerque demasiado a la escoria fundida, en casos extremos los *interlocks* de proceso desconectan el horno para evitar excesos de corriente que afecten la integridad del sistema, generando tiempo perdido de producción e inestabilidad del proceso. %Fe en escoria también está presente en dos formas FeO y Fe⁰ (en muy baja proporción), la presencia de FeO facilita la evacuación de la escoria, ya que el incremento del contenido de éste componente disminuye la temperatura de fusión y viscosidad de la escoria fundida¹¹.

- Composición química del metal o fase FeNi: Ésta fase está compuesta básicamente por Ni y Fe metálicos. El %Ni debe ser tan alto como sea posible ya que es el producto vendible y debe mantenerse por encima de un valor mínimo (26%) acordado contractualmente entre clientes y el departamento de marketing de South 32 (multinacional a la que pertenece CMSA), el Fe diluye el Ni en la aleación FeNi y no genera ingresos a la empresa, es decir su alto contenido en el metal causa ineficiencias de proceso y logísticas similares a las generadas al procesar y/o transportar materiales con alto contenido de aire o humedad, sin embargo su presencia en el metal no representa mayor problema para los clientes que

¹¹ Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals 1st Edition

finalmente utilizan el FeNi de CMSA para la producción de acero inoxidable. Una alta reducción de Fe en el horno eléctrico y por ende alto contenido de Fe en el metal (y bajo contenido de Ni) son fenómenos ocasionados por un alto contenido de carbono residual en la calcina o mineral calcinado (producto intermedio del calcinador que se alimenta al horno eléctrico), y produce dos efectos negativos: excesiva dilución del Ni en la aleación FeNi y disminución del %FeO en la escoria que es donde se necesita el Fe para evitar la retención de escoria en el horno eléctrico¹⁵.

Otros conceptos desarrollados en el proyecto.

Carbón: Sólido oscuro, estratificado y combustible, resultado de la acumulación y enterramiento de materia vegetal desde las primitivas eras geológicas. El carbón se caracteriza por ser combustible fósil del que existe mayor cantidad de recursos, cifrándose en un 75% del total de las reservas estimadas.

Carbono: Elemento químico principal componente de los compuestos de origen orgánico, cuyas mezclas constituyen los combustibles fósiles.

Carbono fijo: Medida de la cantidad de carbono que no se volatiliza durante procesos de calentamiento, pero tampoco permanece en la las cenizas después de una combustión completa. Es una medida de la calidad del carbón.

¹⁵ CERRO MATOSO S.A., Manual Subfase Calcinacion.doc

Ceniza: Es el residuo sólido tras una combustión completa de toda la materia orgánica de la oxidación de la materia mineral presente en el carbón.

Dosis o consumo unitario de carbón: Medida del consumo de carbón y de la eficiencia con la cual se está utilizando éste en el proceso RKEF, se expresa en Kg carbón/Ton Mineral seco alimentados al calcinador.

Escoria: Principal residuo del proceso de producción de FeNi de Cerro Matoso S.A., se dispone en botaderos como sólido granulado. Sus principales componentes son SiO_2 , MgO y FeO .

Ferroníquel: Producto final de Cerro Matoso S.A., aleación de Fe (70-75%) y Ni (30-25%) que se comercializa principalmente como insumo para fabricar acero inoxidable.

Grado de níquel en metal: Contenido de Ni en el metal crudo (sin refinar) que se extrae del horno eléctrico, se expresa en porcentaje.

Horno calcinador: Cilindro horizontal rotatorio que se utiliza como contactor gas-sólido entre los gases de combustión y el mineral laterítico para eliminar la humedad del mineral y pre reducir los óxidos de Ni y Fe, su producto es el mineral calcinado y pre reducido conocido como calcina.

Horno eléctrico: Cilindro vertical alimentado con la calcina proveniente del horno calcinador, el cual utiliza electricidad para producir arcos eléctricos en su interior, cuya energía funde la calcina y termina las reacciones de reducción de los óxidos de Ni y Fe, la calcina fundida se separa en dos fases: metal y escoria.

Humedad residual del carbón: Humedad del carbón determinada en laboratorio de análisis químico por calentamiento a 105°C hasta peso constante de la muestra.

Materia volátil del carbón: Gases que se desprenden del carbón durante la fase inicial del proceso de combustión, consistentes en distintas cantidades de hidrógeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular.

Mineral clasificado: Mineral laterítico de Cerro Matoso S.A. que ha sido sometido a los procesos de trituración, secado y clasificación en zarandas, éste último para incrementar en un 8% el contenido de Ni del mineral que se alimentará a los calcinadores.

Pérdidas de níquel en la escoria: Contenido de Ni en la escoria que se extrae del horno eléctrico, la cual no se puede recuperar posteriormente. El contenido total de Ni se divide en dos tipos, el Ni metálico o por arrastre físico y el Ni como NiO el cual es causado por pobre reducción en el proceso RKEF.

Proceso RKEF: Proceso piro metalúrgico para producir FeNi a partir de laterita níquel utilizando etapas de calcinación (Rotary Kiln) y reducción-fusión (Electric Furnace).

Retención de escoria: Problema operativo del proceso RKEF, consistente en la imposibilidad o dificultad para evacuar la escoria del horno eléctrico a un flujo suficientemente alto para evitar la acumulación dentro de horno. Por fundamentos de proceso y experiencia se sabe que a %Fe en escoria por debajo de ciertos valores límite, la probabilidad de retención de escoria es ostensiblemente más alta.

Capítulo 3

El modelo de programación lineal: función objetivo, variables de decisión y restricciones

En este trabajo se propone el uso de la programación lineal para construir un modelo que permita estimar el consumo unitario óptimo de carbón en el proceso, con base en una función utilidad que considere por un lado los ingresos favorecidos por un alto %Ni en el metal FeNi (producto vendible), y por otro lado los costos del consumo de carbón bituminoso (insumo variable) y el %Ni en la escoria (pérdidas de Ni no recuperables en escoria). Al resolver el modelo se debe hallar el consumo unitario de carbón y los valores de las demás variables de decisión que maximizan la función utilidad definida.

3.1 Definición del sistema

$$F.O. = Z_{max} = Ton\ Ni\ Metal * Precio\ Ni - Ton\ Ni\ Escoria * Precio\ Ni - Ton\ Carbón * Costo\ Carbón$$

Ecuación 3.1. Función utilidad del proceso, función objetivo del modelo

La función objetivo está sujeta básicamente a 7 restricciones que interrelacionan las 5 variables de decisión consideradas por el modelo. Matemáticamente:

Línea 1

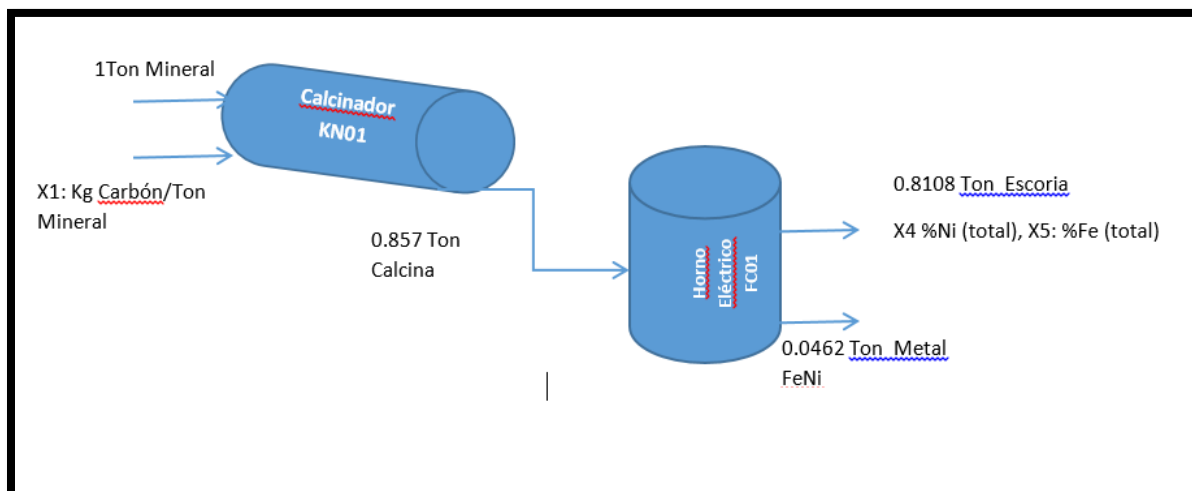


Figura 3.1 Balance masa unitario del proceso RKEF para línea 1

Fuente: elaboración propia

Línea 2

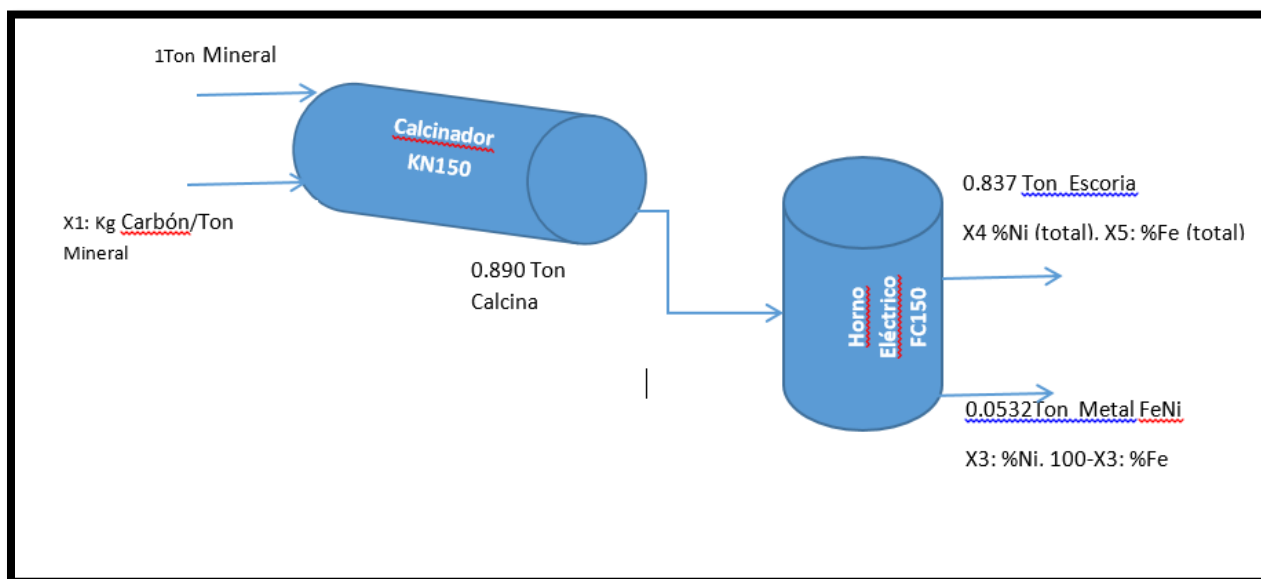


Figura 3.2 Balance de masa unitario del proceso RKEF para línea 2

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en las figuras 3.1 y 3.2 los balances de masa unitarios son muy similares, la diferencia radica en las recuperaciones de calcina (masa de calcina/masa de mineral), que para línea 2 es más alta, y las proporciones escoria/metal que es más alta para la línea 1 (17.5 línea 1 vs 15.7 línea 2). Los valores de recuperaciones de calcina fueron tomados como la mediana o cuartil 2 de todos los datos del FY16 (Julio 2015 a Junio de 2016), mientras que las proporciones escoria metal fueron obtenidas totalizando la escoria y el metal producido por cada línea en el mismo año financiero FY16. En los balances unitarios quedan definidos las 5 variables de decisión del modelo.

X₁: Consumo unitario de carbón en Kg/Ton mineral seco, es la variable controlable clave cuyo valor define el desempeño del sistema RKEF, por lo tanto se debe determinar cuál es el valor que maximiza la función utilidad.

X₂: Contenido de carbono en la calcina (%), según el artículo (Handbook of Ferroalloys, Chapter 5 Dewatering and Calcination of Laterite Ores, Michael Gasik, 1st edition, 2013)¹⁶, variable clave ya que es la en el desempeño del proceso de calcinación y reducción/fusión. Con respecto a la calcinación (RK o Rotary Kiln), es una medida indirecta del avance de las reacciones de pre reducción del Ni y el Fe en el calcinador, si se adiciona la cantidad adecuada de carbón a la entrada del calcinador, un bajo % de C en la calcina o muestra

¹⁶ Handbook of Ferroalloys, Chapter 5 Dewatering and Calcination of Laterite Ores, Michael Gasik, 1st edition, 2013

MK significa una alta pre reducción en el calcinador, esto está directamente relacionado con el perfil de temperaturas de mineral dentro del calcinador, que para línea 2 ha sido históricamente más alto que para línea 1. Con respecto al horno eléctrico (Electric Furnace), una pre reducción alta de Ni y Fe en el calcinador y un bajo %C en la calcina implica una alta selectividad en la reducción del Ni, que es lo deseado, ya que Ni y Fe compiten en el horno eléctrico por la reducción reaccionado con el carbono, si el %C en calcina es bajo, reaccionará principalmente con el Ni y no con el Fe, produciendo un FeNi con alto %Ni y manteniendo el hierro en forma de FeO en la escoria.

X₃: %Ni en el metal FeNi, representa la concentración del producto vendible, se debe maximizar su valor, ya que favorece los ingresos. La dosis de carbón a calcinadores se estima para que alrededor de un 90% ¹⁷del Ni se reduzca y se recupere en el metal FeNi

X₄: %Ni total en la escoria, la fase escoria contiene trazas de metal FeNi producto de la separación imperfecta de las fases metal y escoria, y normalmente la escoria contiene Ni en forma de NiO que no se alcanza a reducir ni en el calcinador ni en el horno eléctrico. El análisis químico de la escoria se hace por XRF (difracción de rayos x), dicho método no diferencia Ni en metal (Ni⁰) y Ni como NiO, por lo tanto se obtiene un %Ni total. %Ni en escoria como valor individual representa pérdidas o costos para el proceso, por eso es conveniente que su valor sea tan bajo como sea posible.

X₅: %Fe total en escoria, al igual que el Ni, el Fe en la en la escoria se encuentra en dos formas, metal y óxido, también se analiza el contenido de Fe por XRF. La dosis de carbón que se alimenta a calcinadores se estima para que alrededor de un 20% del Fe se reduzca y se

¹⁷ CERRO MATOSO S.A., Manual Subfase Calcinacion.doc

recupere en el metal, el resto debería mantenerse como FeO en la escoria, de esta forma se evita diluya excesivamente el %Ni en el metal FeNi. Adicionalmente se requiere un cierto contenido de Fe (como FeO) en la escoria para garantizar que la temperatura de *liquidus* y la viscosidad de la escoria son adecuadas para poder lograr una evacuación continua.

Una vez definidas las variables de decisión, se puede construir la función objetivo asumiendo los siguientes precios de Ni LME (London Metal Exchange) y carbón:

- Precio Ni: 11000 USD/Ton Ni (promedio FY16)
- Precio carbón: 58USD/Ton carbón (promedio FY16)

Reemplazando los valores del balance de masa unitario de cada línea y los precios de Ni y carbón, las funciones objetivo quedan de la siguiente forma:

Para L1:

$$\begin{aligned} Z_{max} = & 0.0462Ton * X3 * 0.01 * \frac{11000USD}{ton} - 0.8108 * X4 * 0.01 * \frac{11000USD}{ton} \\ & - 0.001 * X1 * \frac{58USD}{Ton} \end{aligned}$$

Ecuación 3.2 Función objetivo (utilidad) para L1

Para L2:

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.001 * X1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Ecuación 3.2 Función objetivo (utilidad) para L2

3.2 Restricciones

1. **Relación entre %C en la calcina (X2) y consumo unitario de carbón (X1):** Con datos históricos de todo el FY16 se calcula por balance de masa el % conversión del carbono del carbón alimentado en la fase de calcinación para cada una de las 2 líneas de producción, obteniendo las siguientes distribuciones:

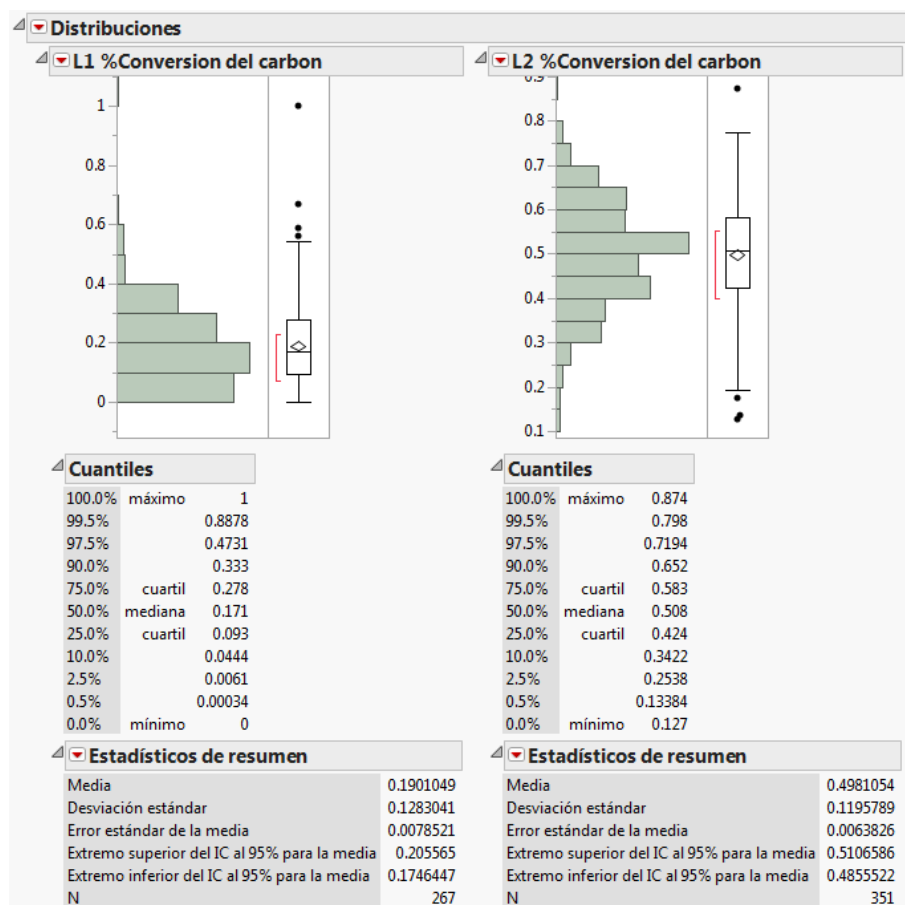


Figura 3.3 Distribución de valores de conversión de carbono para las dos líneas de producción

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Se observa que la media de conversión de carbono para línea 1 es de 19%, mientras que para la línea 2 se toma la mediana que es de 50.8%, entre media y mediana se tomó el valor más alto de ésta forma se garantiza que el consumo unitario óptimo de carbono no sea tan alto, ya que históricamente se ha observado la tendencia a adicionar más carbón del necesario para compensar ineficiencias en el perfil de temperatura de los calcinadores. Químicamente el significado de la conversión de carbono cuantifica la porción del

contenido de carbono contenido en el carbón alimentado al calcinador que reacciona gasificándose para generar CO y CO₂, el restante 81% para L1 y 49.2% para L2 permanece sin reaccionar como carbono sólido residual en la calcina y posteriormente reacciona con los óxidos de Ni y Fe en el horno eléctrico. Para poder convertir el requerimiento de carbono elemental en carbón se utiliza el parámetro %Carbono Fijo (CF) que es la razón masa de carbono/masa de carbón expresado como porcentaje, y que es determinado rutinariamente por el laboratorio de análisis químico de CMSA, para el carbón que utiliza CMSA CF=38%.

Para L1

$$X1 = \frac{X2 * 0.01 * 0.857Ton * 1000kg/ton}{(100\% - 19\%) * 38\%}$$

Ecuación 3.3 Consumo unitario de carbón (X₁) en función del %C en calcina (X₂), L1

Para L2

$$X1 = \frac{X2 * 0.01 * 0.890Ton * 1000kg/ton}{(100\% - 50.8\%) * 38\%}$$

Ecuación 3.4 Consumo unitario de carbón (X₁) en función del %C en calcina (X₂), L2

De las ecuaciones 3.3 y 3.4 se deducen que las ecuaciones lineales siguientes, las cuales son las mismas para una misma línea de producción independiente de la Fe/Ni en calcina (8, 9, 10):

L1

$$X1 - 27.84 * X2 = 0$$

L2

$$X1 - 44.769 * X2 = 0$$

2. Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria y %C en calcina:

Mediante un muestreo especial de la escoria realizado durante 15 días de operación normal, se pudo establecer estadísticamente que el porcentaje de Ni en escoria como Ni metálico es de 0.097% para la línea 1 y 0.091% para línea 2, y que dichos valores son prácticamente fijos ya que no están relacionados con el desempeño de las reacciones de reducción en calcinador y horno eléctrico. El muestreo realizado fue especial y no rutinario, ya que el análisis químico de Ni como NiO en la escoria es un procedimiento con alto costo de reactivos (por XRF se determina %Ni y %Fe totales, no por especies químicas), y la poca variabilidad del resultado no justifica la implementación de dicho análisis dentro del conjunto de análisis químicos rutinarios, ya que el análisis químico de Ni y Fe como NiO y FeO en la escoria es un procedimiento con alto costo de reactivos y de riesgo para los analistas por la toxicidad de las sustancias utilizadas para realizar el análisis. Tomando los datos históricos de todo el FY16 (Julio 2015 a Junio 2016) para %Ni en escoria y los valores %Ni metálico (muestreo especial) se determina una correlación lineal entre %Ni como NiO, es decir:

$X_4 - 0.097$ para L1 vs %C en calcina de L1

$X_4 - 0.091$ para L2 vs %C en calcina de L2

La determinación de %Ni total (X_4) y %C en calcina (X_2) se hace de forma rutinaria. Las correlaciones lineales de X_4 -%Ni metálico vs %C en calcina fueron determinadas para cada línea y para cada relación Fe/Ni en calcina=8, 9, 10, por lo tanto se generó una correlación para cada una de las 6 corridas de optimización en Solver.

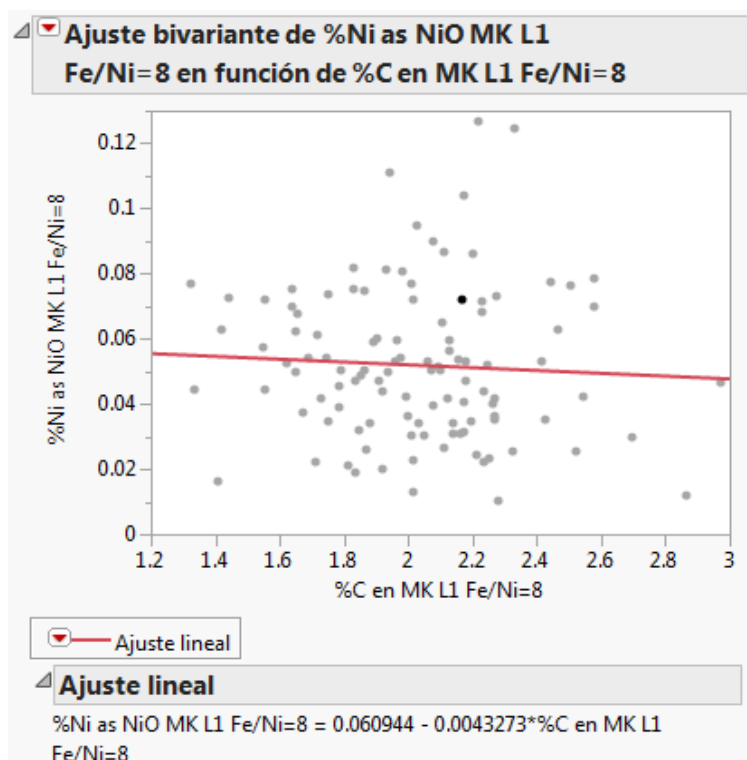


Figura 3.4 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=8

$$X_4 - 0.097 = -0.00433 * X_2 + 0.0609 \rightarrow X_4 + 0.004373 = 0.162$$

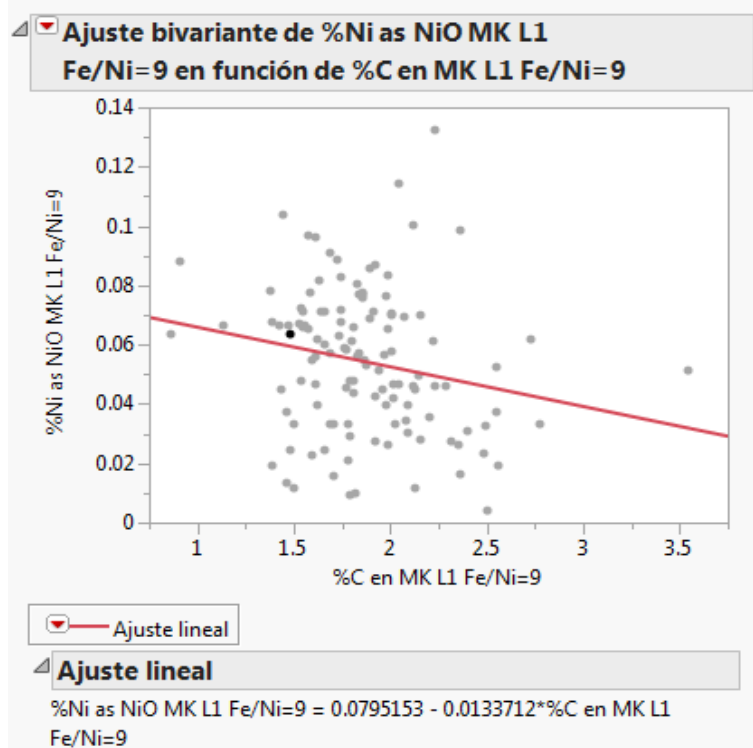


Figura 3.5 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=9

$$X_4 - 0.0097 = -0.01337 * X_2 + 0.0795 \rightarrow X_4 + 0.01337 * X_2 = 0.1765$$

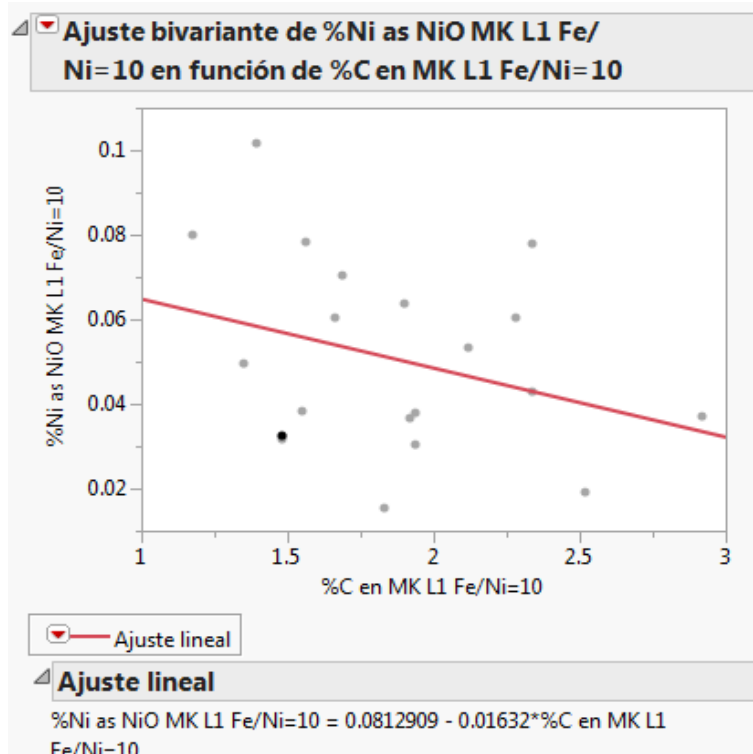


Figura 3.6 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina

Para L1, Fe/Ni=10

$$X_4 - 0.097 = -0.01632 * X_2 + 0.0813 \rightarrow X_4 + 0.01632 * X_2 = 0.178$$

Haciendo el mismo ejercicio estadístico se obtienen las otras tres correlaciones lineales

X_4 vs X_2 para a línea 2.

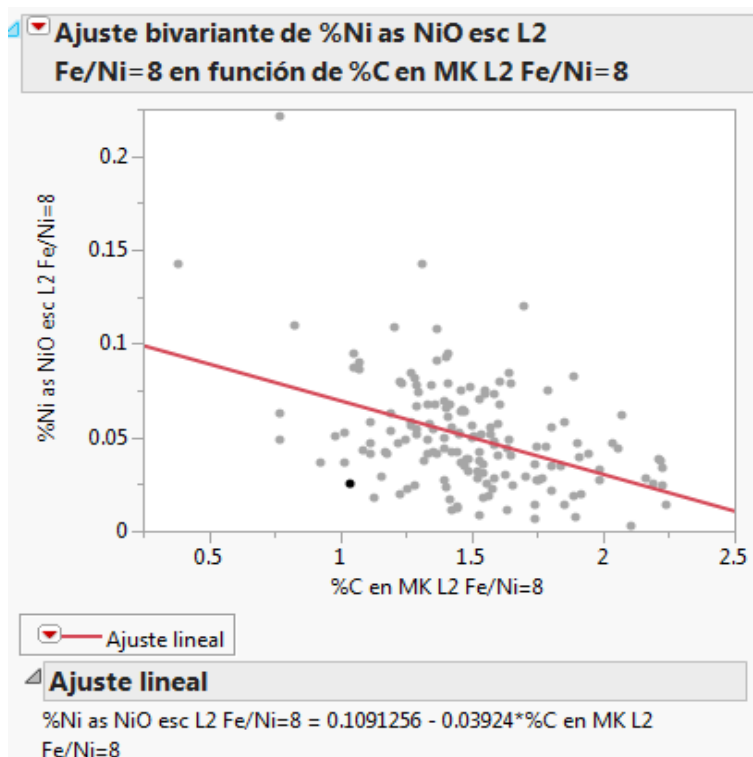


Figura 3.7 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=8

$$X_4 - 0.091 = -0.03924 * X_2 + 0.1091 \rightarrow X_4 + 0.03924 * X_2 = 0.201$$

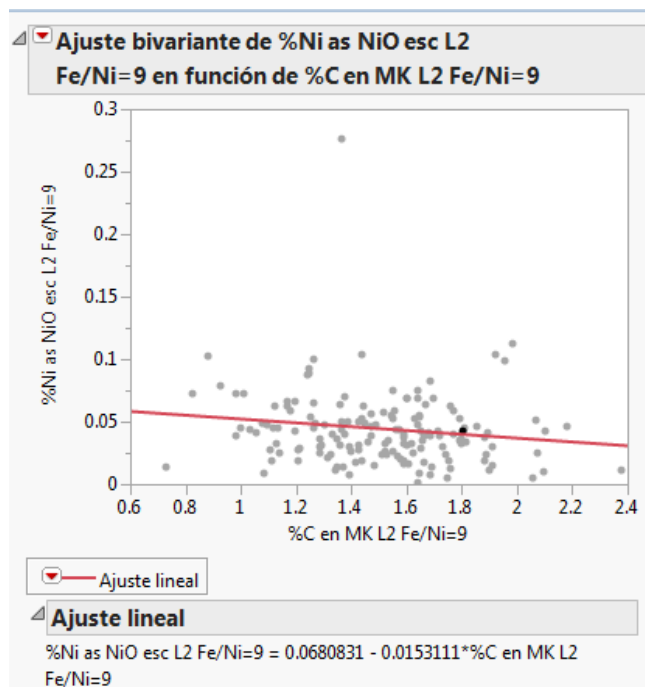


Figura 3.8 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=9

$$X_4 - 0.091 = -0.01531 * X_2 + 0.06808 \rightarrow X_4 + 0.01531 * X_2 = 0.1591$$

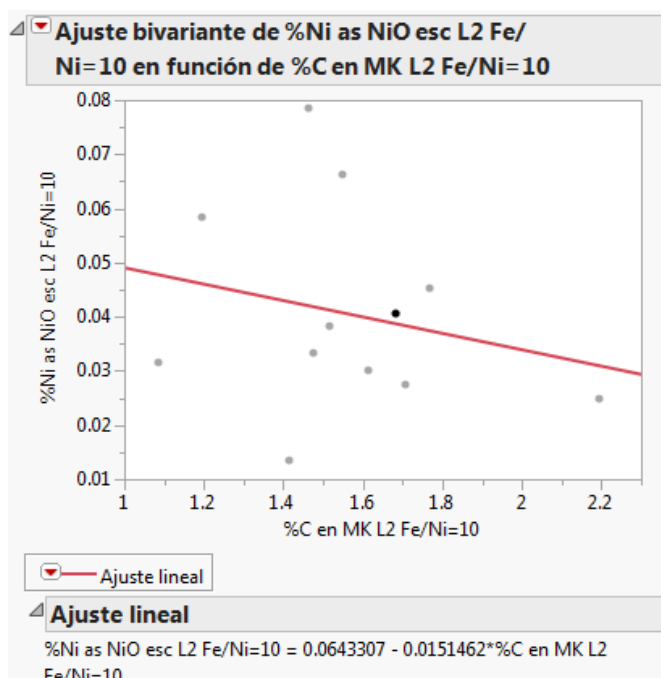


Figura 3.9 Regresión lineal X_4 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=10 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=10

$$X_4 - 0.091 = -0.01515 * X_2 + 0.0643 \rightarrow X_4 + 0.01515 * X_2 = 0.1553$$

3. Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria y %C en calcina (X_2):

Mediante el mismo muestreo especial descrito en el numeral anterior, se estableció que el %Fe como Fe metálico en escoria es de 0.25% para L1 y 0.24% para L2, y que al igual que el %Ni metálico en escoria dicho valor es prácticamente fijo ya que no está relacionado con el desempeño de las reacciones de reducción en calcinador y horno eléctrico. Al igual que la correlación %Ni como NiO en escoria versus %C en calcina, se tomaron los valores históricos de %Fe total en escoria (X_5) durante el año financiero FY16, se les descontó el contenido de Fe metálico (X_5 -%Fe metal) para obtener el %Fe como FeO y este resultado se correlacionó linealmente con el %C de la calcina de cada línea de producción, es decir:

$X_5 - 0.25\%$ para L1 vs %C en calcina de L1

$X_5 - 0.24\%$ para L1 vs %C en calcina de L2

La determinación de %Fe total (X_4) y %C en calcina (X_2) se hace de forma rutinaria. Las correlaciones lineales de X_4 -%Ni metálico vs %C en calcina fueron determinadas para cada línea y para cada relación Fe/Ni en calcina=8, 9, 10, por lo tanto se generó una correlación para cada una de las 6 corridas de optimización en Solver.

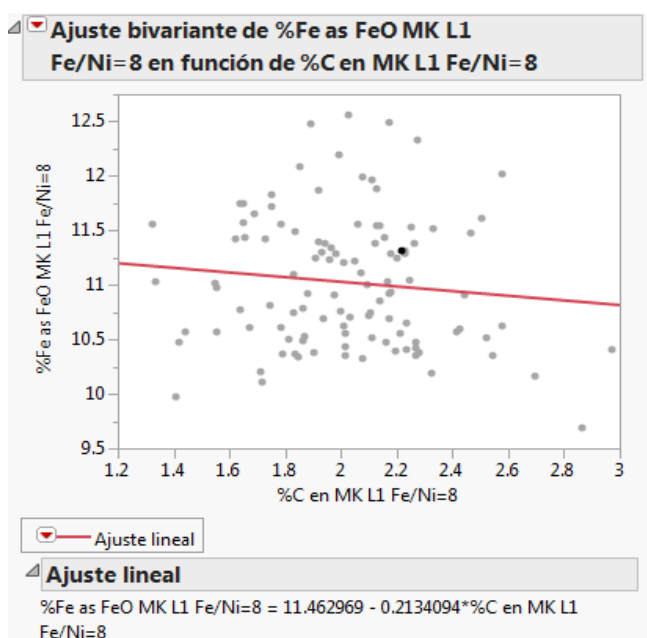


Figura 3.10 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=8

$$X_5 - 0.25 = -0.2134 * X_2 + 11.4629 \rightarrow X_5 + 0.2134 * X_2 = 11.7129$$

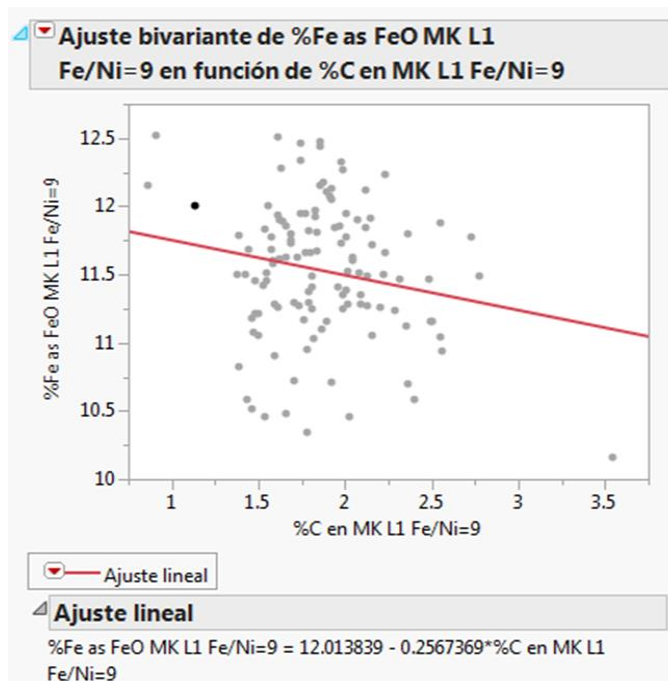


Figura 3.11 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=9

$$X_5 - 0.25 = -0.2567 * X_2 + 12.0138 \rightarrow X_5 + 0.2567 * X_2 = 12.2638$$

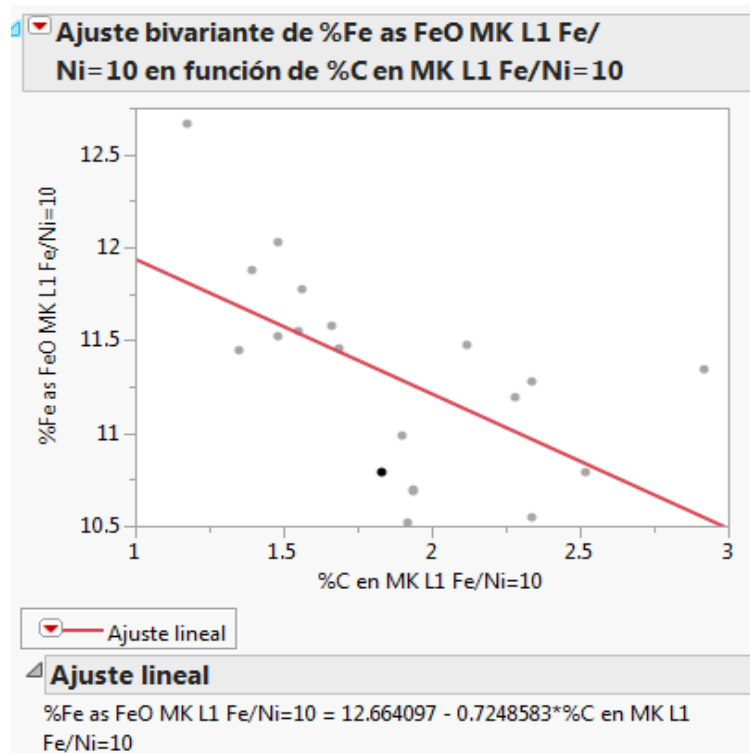


Figura 3.12 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=10

$$X_5 - 0.25 = -0.7248 * X_2 + 12.6641 \rightarrow X_5 + 0.7248 * X_2 = 12.9141$$

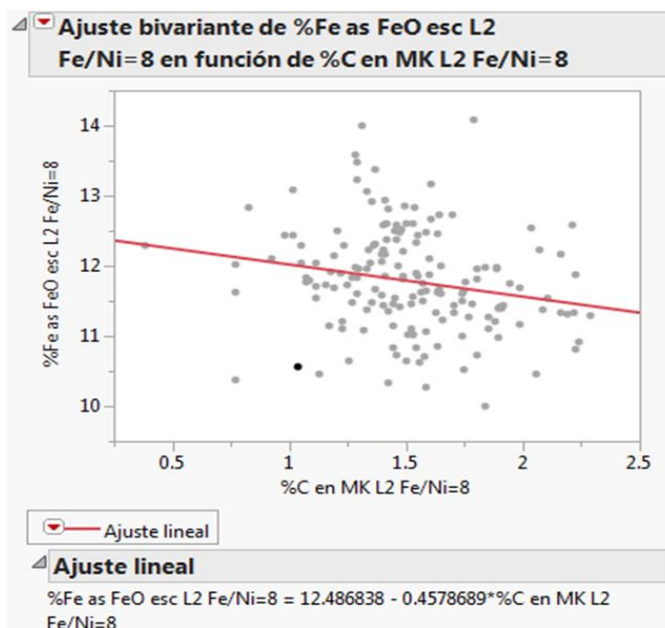


Figura 3.13 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=8

$$X_5 - 0.24 = -0.4579 * X_2 + 12.4868 \rightarrow X_5 + 0.4579 * X_2 = 12.7268$$

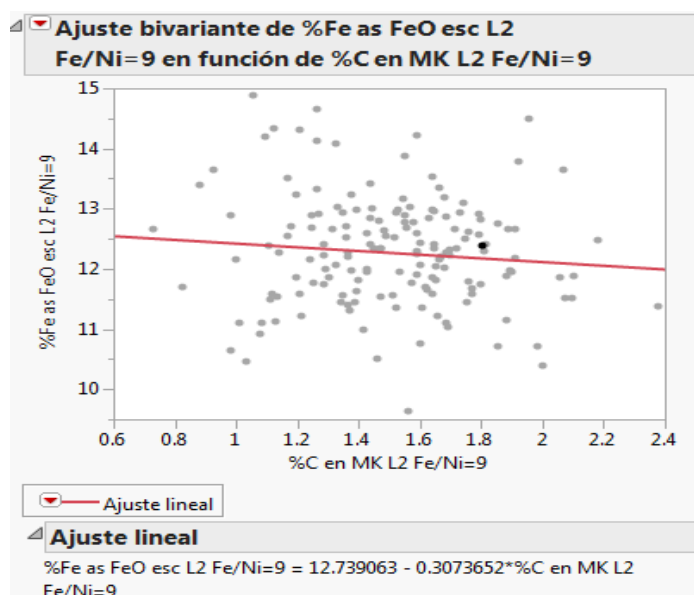


Figura 3.14 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=9

$$X_5 - 0.24 = -0.3074 * X_2 + 12.7391 \rightarrow X_5 + 0.3074 * X_2 = 12.9791$$

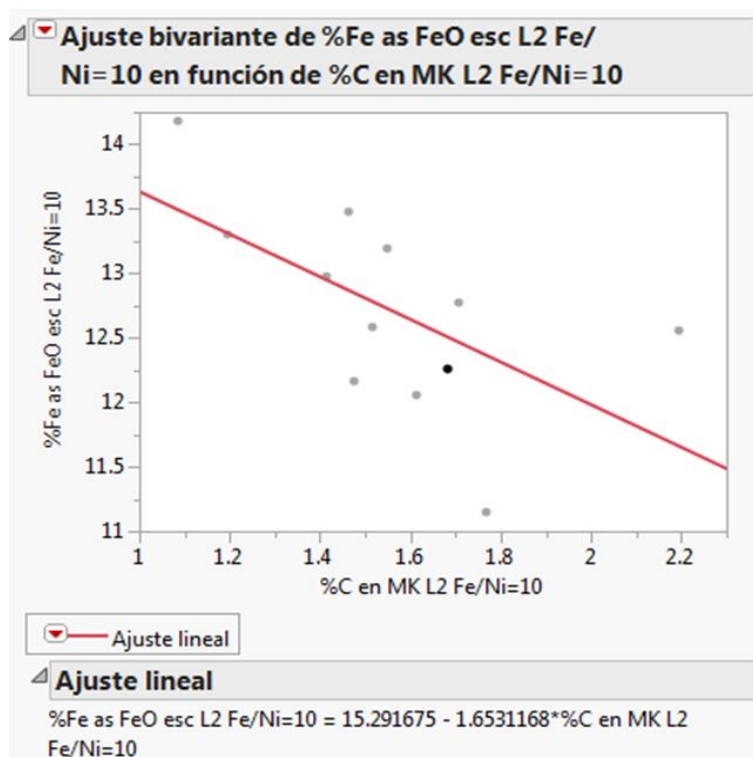


Figura 3.15 Regresión lineal X_5 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=10 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=10

$$X_5 - 0.24 = -1.6531 * X_2 + 15.2917 \rightarrow X_5 + 1.6531 * X_2 = 15.5317$$

4. Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X_3) y %C (X_2) en calcina:

Teniendo en cuenta que son datos de seguimiento rutinarios, se toman los históricos del FY16 para cada una de las dos líneas, agrupados por relación Fe/Ni en calcina=8, 9, 10, por tanto se tendían 6 correlaciones lineales una para cada corrida.

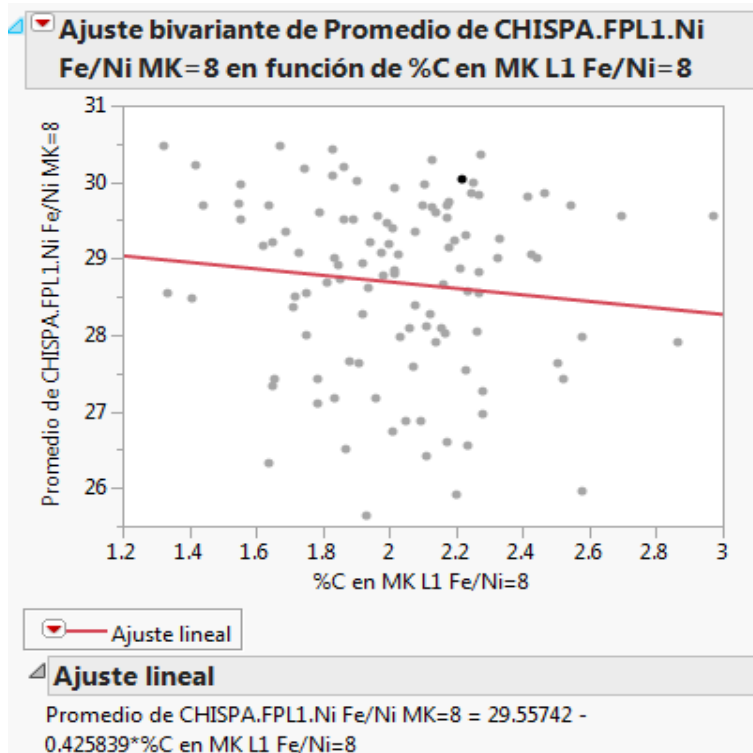


Figura 3.16 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=8

$$X_3 + 0.4258 * X_2 = 29.5574$$

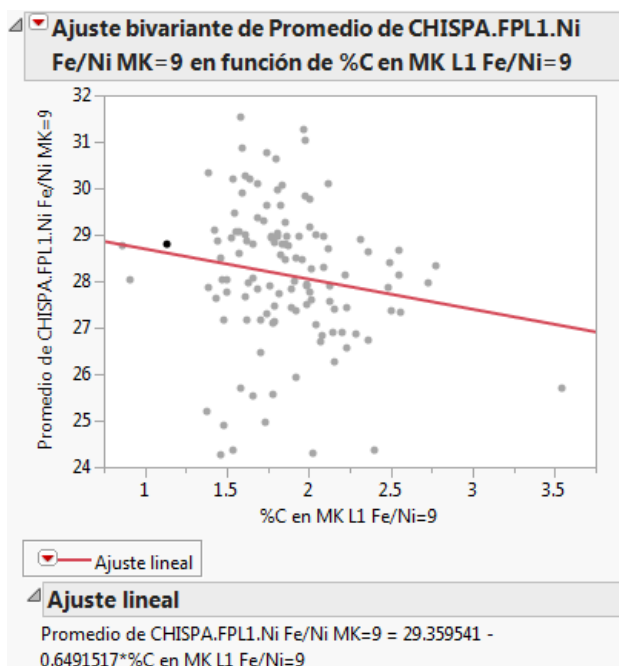


Figura 3.17 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=9

$$X_3 + 0.6491 * X_2 = 29.3595$$

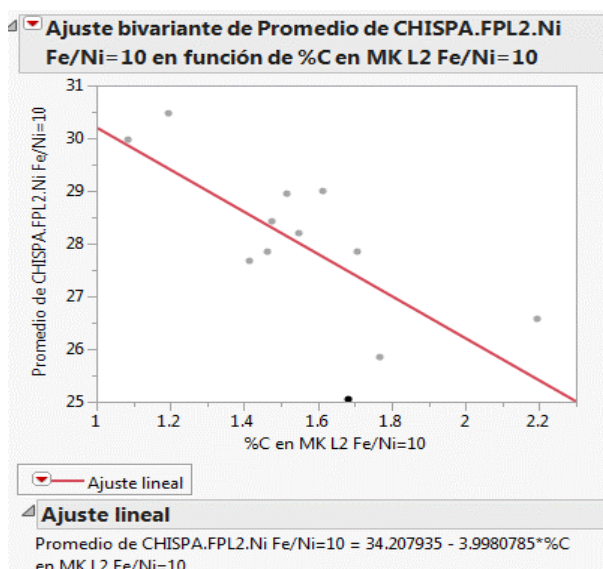


Figura 3.18 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 1, relación Fe/Ni=10 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L1, Fe/Ni=10

$$X_3 + 3.9981 * X_2 = 34.2079$$

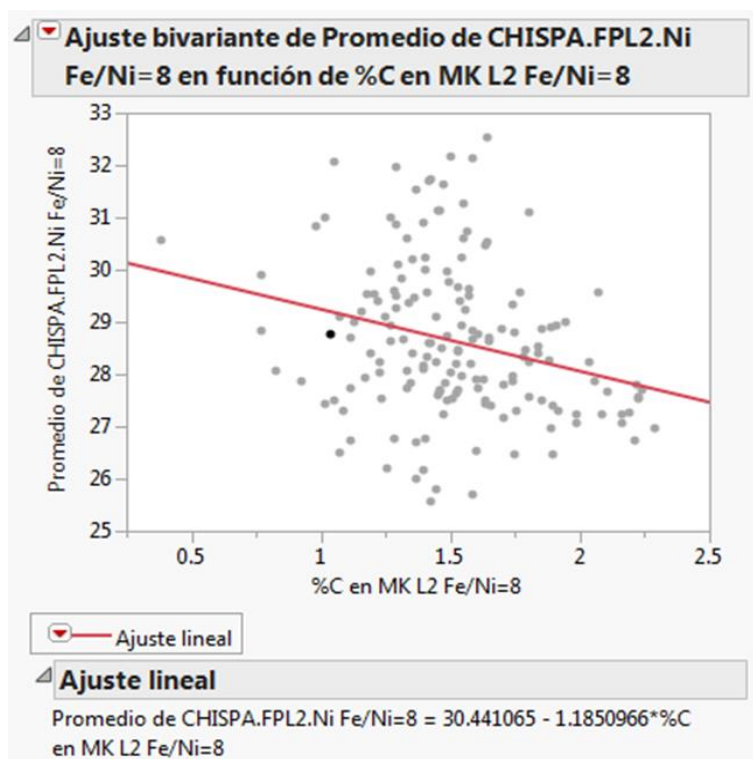


Figura 3.19 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=8 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=8

$$X_3 + 1.1851 * X_2 = 30.4411$$

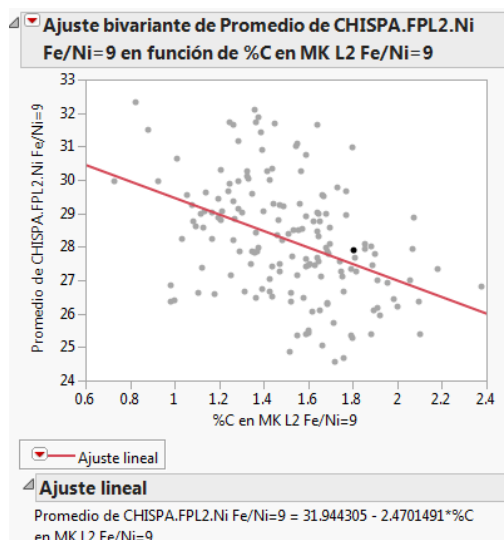


Figura 3.20 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=9 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=9

$$X_3 + 2.4701 * X_2 = 31.9443$$

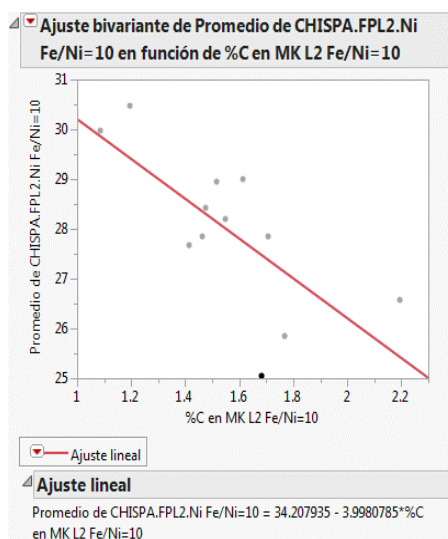


Figura 3.21 Regresión lineal X_3 vs X_2 para línea 2, relación Fe/Ni=10 en calcina

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para L2, Fe/Ni=10

$$X3 + 3.9981 * X2 = 34.2079$$

5. **Coeficiente de partición de Ni:** En la industria del FeNi éste es un parámetro importante¹⁸ para caracterizar el desempeño del proceso, y se define como la razón:

$$\text{Coeficiente de partición (Ni)} = \frac{\%Ni \text{ en FeNi}}{\%Ni \text{ en escoria}} = \frac{X3}{X4}$$

Ecuación 3.5 Coeficiente de partición de Ni

Para las características del mineral de CMSA y el diseño de proceso utilizado, que un desempeño aceptable está relacionado con un coeficiente de partición alrededor de 200, sin embargo tomando los datos históricos del FY16 para X₃ (%Ni en metal) y X₄ (%Ni en escoria) se observa distribuciones con mediana de 190 para línea 1 y 208 para línea 2. Como era de esperarse el coeficiente partición de Ni es más alto para línea 2 debido a que el perfil de temperatura del calcinador KN150 es más alto que del KN01. De ésta forma, las restricciones quedan:

Para L1

¹⁸ Mechanical slag losses in laterite smelting –Nickel-, M.Y. Solar, Pyrometallurgy of Nickel and Cobalt 2009

$$\frac{X3}{X4} \geq 190$$

Entonces,

$$X3 - 190 * X4 \geq 0$$

Para L2

$$\frac{X3}{X4} \geq 208$$

Entonces,

$$X3 - 208 * X4 \geq 0$$

6. **Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X3):** Marketing de South 32 ha establecido 26% como el mínimo contenido de Ni en FeNi para garantizar la comercialización favorable del FeNi. Matemáticamente:

$$X3 \geq 26$$

Ésta restricción aplica para ambas líneas para todas las relaciones Fe/Ni en calcina evaluadas (8, 9 y 10).

7. **Restricción %Fe mínimo en escoria (X5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria:** Cuando los hornos eléctricos presentan retención de escoria, el sistema de izamiento, cuyo objetivo es subir y bajar los electrodos para regular la corriente

eléctrica que se suministra desde estos en el interior del horno hacia la calcina y la escoria, eleva los electrodos para evitar la sobre corriente que puede incluso disparar el horno eléctrico para proteger los transformadores de cada horno eléctrico. Es por esto que para definir el valor mínimo de %Fe total en la escoria (X_5) para cada línea se estableció la distribución y mediana (para $L1 = 74.1\text{cm}$) de la posición de electrodos a lo largo del FY16, luego por medio de una correlación lineal de posición de electrodos vs %Fe en escoria se determina cual es el valor de %Fe que hace que la posición de electrodos se incremente 3% con respecto a la mediana (para línea $1 = 1.03 * 74.1\text{cm} = 76.32\text{cm}$).

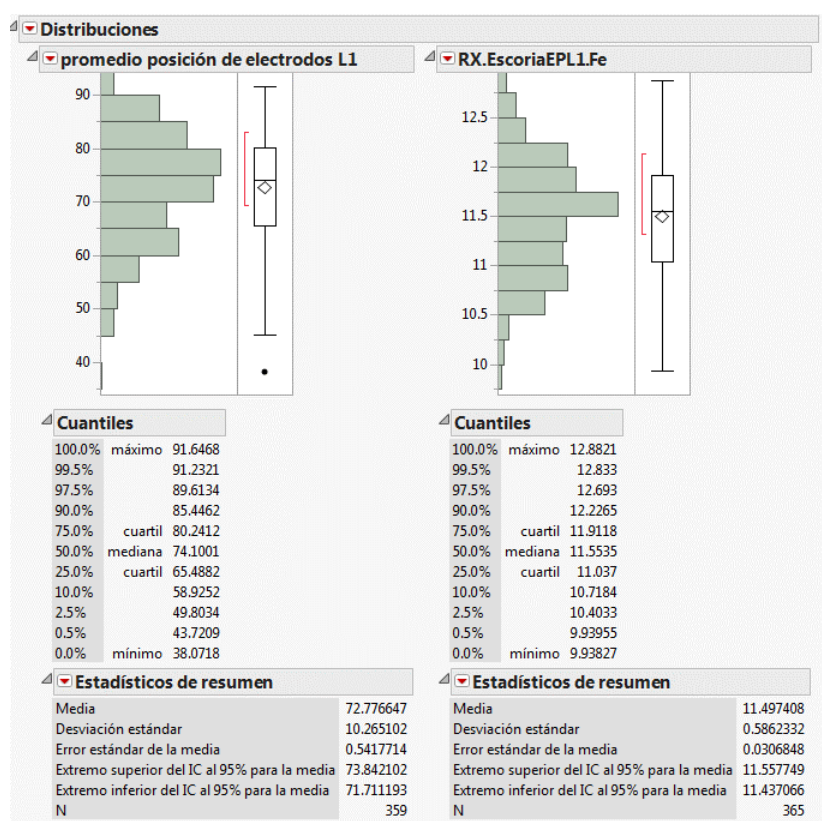


Figura 3.23 Distribución de posición de electrodos y %Fe en escoria de L1 para el FY16

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

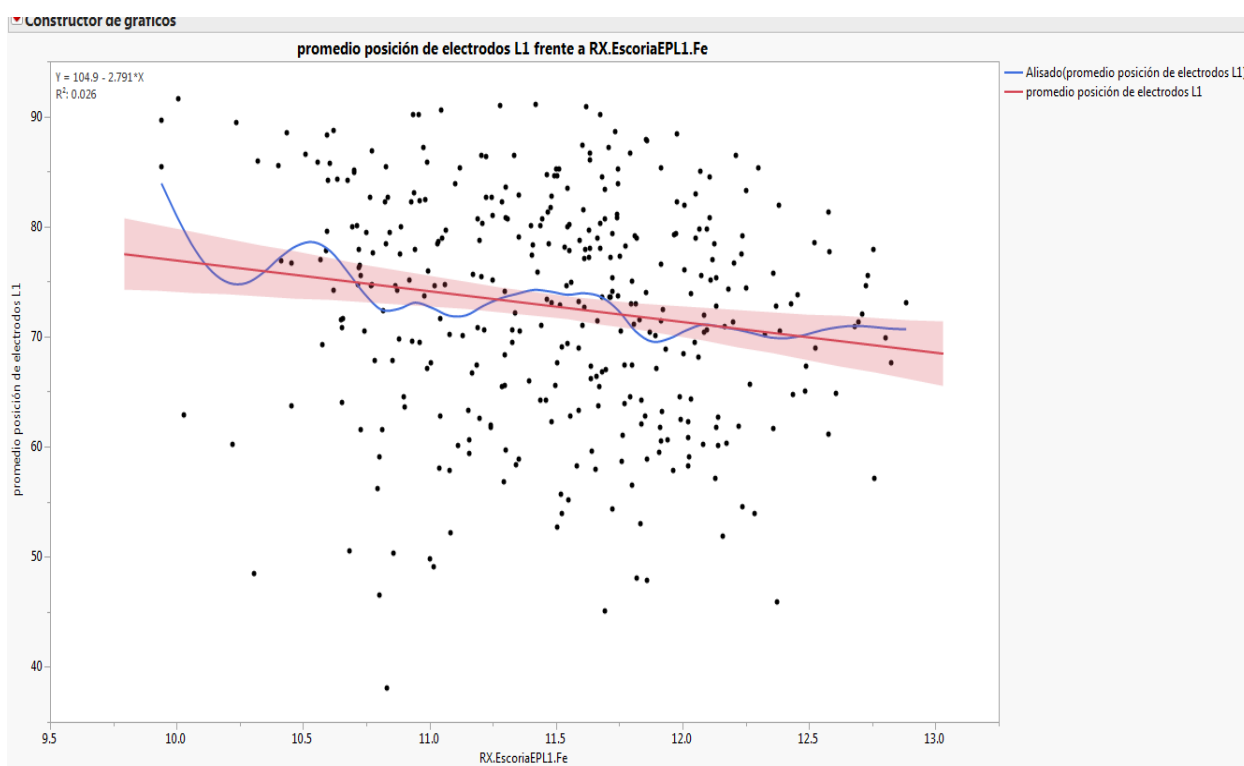


Figura 3.23 Correlación lineal Posición de electrodos vs %Fe en escoria

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

De la correlación lineal de la figura 3.4, si $Y=76.32$, entonces $X=10.24$, por lo tanto el mínimo valor de %Fe en escoria que deben arrojar las corridas del modelo de L1 es 10.24% para minimizar la probabilidad de retención de escoria. Haciendo el mismo ejercicio para la línea 2, se encuentra que el mínimo valor de %Fe en escoria es de 11.23%.

Las restricciones de %Fe en escoria quedan:

L1, $X_5 \geq 10.24$

L2, $X_5 \geq 11.23$

Se restringe los valores solución de X_1 a X_5 a valores mayores o iguales que cero.

De éste capítulo se concluye que es posible, bajo las suposiciones descritas, modelar el sistema por medio de un modelo de programación lineal, por lo tanto se utiliza la herramienta Solver de MS Excel para resolver el modelo y proceder a evaluar los resultados obtenidos.

Con base en la función objetivo y las restricciones descritas analíticamente en éste capítulo, se procedió a construir los 3 modelos o corridas para las líneas 1 y 2, para los tres valores de relaciones Fe/Ni en calcina evaluados (8, 9, 10). Los resultados obtenidos para el consumo unitario de carbón (X_2) y las demás variables de decisión se presentan y analizan en el capítulo 4.

Capítulo 4

Validación y análisis de resultados

Las tablas anexas muestran los resultados de correr los modelos con la herramienta Solver de MS Excel configurado con el método de resolución Simplex LP. En los 6 modelos se cumplen todas las restricciones, se estiman los valores de las variables de decisión y se calcula el valor de la utilidad maximizado.

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)		
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		45.62	1.64	28.86	0.152	11.36			
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.082	-89.188	0	130.483		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-27.84				-	=	0.00
	%Ni escoria (NiO) vs %C en calcina		0.00433		1		0.159	=	0.159
	%Fe escoria (FeO) vs %C en calcina		0.2134			1	11.713	=	11.713
	%Ni metal vs %C en calcina		0.426	1			29.560	=	29.560
	Coficiente de partición Ni<=190			1	-190		0.000	>=	-
	Límite comercial %Nimetal<=26%			1			28.862	>=	26.000
	Límite %Fe(FeO)escoria<=10.24					1	11.363	>=	10.240

Tabla 4.1 Modelo resuelto para L1, Fe/Ni=8

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$D\$5:\$H\$5								
	Cons Unitario carbón							
\$D\$5	(Kg/Ton Min)	45.61633476	0	-0.058	0.121891809	1E+30	0.06389181	-1E+30
\$E\$5	%C en calcina	1.638517772	0	0	3.39346796	1E+30	3.39346796	-1E+30
\$F\$5	%Ni en metal FeNi	28.86199143	0	5.082	1E+30	7.96588723	1E+30	-2.8838872
\$G\$5	%Ni en escoria	0.151905218	0	-89.188	1E+30	783.7108453	1E+30	-872.89885
\$H\$5	%Fe en escoria	11.36334031	0	0	1E+30	15.90191172	1E+30	-15.901912

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$I\$11:\$I\$13 >= \$K\$11:\$K\$13								
\$I\$11	Coficiente de partición Ni<=190 Zmax(USD)	3.55271E-15	-8.5542424	0	2.088233833	0.65	2.08823383	-0.65
\$I\$12	Límite comercial %Nimetal<=26% Zmax(USD)	28.86199143	0	26	2.861991429	1E+30	28.8619914	-1E+30
\$I\$13	Límite %Fe(FeO)escoria<=10.24 Zmax(USD)	11.36334031	0	10.24	1.123340308	1E+30	11.3633403	-1E+30
\$I\$7:\$I\$10 = \$K\$7:\$K\$10								
\$I\$7	Rest Dosis carbón vs %C en calcina Zmax(USD)	0	-0.058	0	1E+30	45.61633476	1E+30	-45.616335
\$I\$8	%Ni escoria (NiO) vs %C en calcina Zmax(USD)	0.159	-1714.494056	0.159	0.010990704	0.003421053	0.1699907	0.15557895
\$I\$9	%Fe escoria (FeO) vs %C en calcina Zmax(USD)	11.713	0	11.713	1E+30	1.123340308	1E+30	10.5896597
\$I\$10	%Ni metal vs %C en calcina Zmax(USD)	29.56	13.6362424	29.56	0.65	1.380031603	30.21	28.1799684

Tabla 4.2 Análisis de sensibilidad para L1, Fe/Ni=8

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)		
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		61.47	2.21	27.93	0.147	11.70			
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.082	-89.188	0	125.246		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-27.84				-	=	0.00
	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina		0.01337		1		0.18	=	0.1765
	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina		0.2567			1	12.26	=	12.264
	%Ni metal vs %C en calcina		0.649	1			29.359	=	29.359
	Coefficiente de partición Ni>=190			1	-190		(0.00)	>=	0.000
	Límite comercial %Nimetal>=26%			1			27.93	>=	26.000
	Límite %Fe(FeO)escoria>=10.24					1	11.70	>=	10.240

Tabla 4.3 Modelo resuelto para L1, Fe/Ni=9

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$D\$5:\$H\$5								
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	61.47086131	0	-0.058	0.13363845	1E+30	0.07563845	-1E+30
\$E\$5	%C en calcina	2.208005076	0	0	3.72049444	1E+30	3.72049444	-1E+30
\$F\$5	%Ni en metal FeNi	27.92600471	0	5.082	1E+30	5.732657072	1E+30	-0.6506571
\$G\$5	%Ni en escoria	0.146978972	0	-89.188	1E+30	278.2718355	1E+30	-367.45984
\$H\$5	%Fe en escoria	11.6970051	0	0	1E+30	14.4935506	1E+30	-14.493551

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$I\$11:\$I\$13 >= \$K\$11:\$K\$13								
\$I\$11	Coefficiente de partición Ni>=190 Zmax(USD)	-3.55271E-15	-1.967162502	0	5.612716025	4.176	5.61271602	-4.176
\$I\$12	Límite comercial %Nimetal>=26% Zmax(USD)	27.92600471	0	26	1.926004706	1E+30	27.9260047	-1E+30
\$I\$13	Límite %Fe(FeO)escoria>=10.24 Zmax(USD)	11.6970051	0	10.24	1.457005097	1E+30	11.6970051	-1E+30
\$I\$7:\$I\$10 = \$K\$7:\$K\$10								
\$I\$7	Rest Dosis carbón vs %C en calcina Zmax(USD)	0	-0.058	0	1E+30	61.47086131	1E+30	-61.470861
\$I\$8	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina Zmax(USD)	0.1765	-462.9488754	0.1765	0.029540611	0.021978947	0.20604061	0.15452105
\$I\$9	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina Zmax(USD)	12.2638	0	12.2638	1E+30	1.457005097	1E+30	10.8067949
\$I\$10	%Ni metal vs %C en calcina Zmax(USD)	29.359	7.049162502	29.359	4.176	1.433945873	33.535	27.9250541

Tabla 4.4 Análisis de sensibilidad para L1, Fe/Ni=9

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)		
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		68.87	2.47	26.22	0.138	11.12			
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.082	-89.188	0	116.926		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-27.84				-	=	0.00
	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina		0.0163		1		0.178	=	0.178
	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina		0.7248			1	12.91	=	12.91
	%Ni metal vs %C en calcina		2.2915	1			31.88	=	31.884
	Coefficiente de partición Ni>=190			1	-190		-	>=	0.00
	Límite comercial %Nimetal>=26%			1			26.22	>=	26.00
	Límite %Fe(FeO)escoria>=10.24					1	11.12	>=	10.24

Tabla 4.5 Modelo resuelto para L1, Fe/Ni=10

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$D\$5:\$H\$5								
	Cons Unitario carbón							
\$D\$5	(Kg/Ton Min)	68.87246182	0	-0.058	0.424078973	1E+30	0.36607897	-1E+30
\$E\$5	%C en calcina	2.473867163	0	0	11.8063586	1E+30	11.8063586	-1E+30
\$F\$5	%Ni en metal FeNi	26.2154334	0	5.082	1E+30	5.152240279	1E+30	-0.0702403
\$G\$5	%Ni en escoria	0.137975965	0	-89.188	1E+30	724.3164785	1E+30	-813.50448
\$H\$5	%Fe en escoria	11.12094108	0	0	1E+30	16.2891261	1E+30	-16.289126

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$I\$11:\$I\$13 >= \$K\$11:\$K\$13								
\$I\$11	Coeficiente de partición Ni>=190 Zmax(USD)	0	-14.65718014	0	0.075728388	1.9927	0.07572839	-1.9927
\$I\$12	Límite comercial %Nimetal>=26% Zmax(USD)	26.2154334	0	26	0.215433395	1E+30	26.2154334	-1E+30
\$I\$13	Límite %Fe(FeO)escoria>=10.24 Zmax(USD)	11.12094108	0	10.24	0.88094108	1E+30	11.1209411	-1E+30
\$I\$7:\$I\$10 = \$K\$7:\$K\$10								
\$I\$7	Rest Dosis carbón vs %C en calcina Zmax(USD)	0	-0.058	0	1E+30	68.87246182	1E+30	-68.872462
\$I\$8	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina Zmax(USD)	0.1783	-2874.052226	0.1783	0.00039857	0.010487895	0.17869857	0.16781211
\$I\$9	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina Zmax(USD)	12.914	0	12.914	1E+30	0.88094108	1E+30	12.0330589
\$I\$10	%Ni metal vs %C en calcina Zmax(USD)	31.8843	19.73918014	31.8843	1.9927	0.05603216	33.877	31.8282678

Tabla 4.6 Análisis de sensibilidad para L1, Fe/Ni=10

4.1 Análisis resultados línea 1.

Para línea 1 se observan resultados consistentes con la teoría del proceso DRKEF, ya que es previsible el hecho de que minerales con relación Fe/Ni en calcina más alta consuman mayores cantidades de carbón (X₁) debido a la mayor competencia del Fe con el Ni. El comportamiento de %C en la calcina (X₂) también con el incremento de la relación Fe/Ni de la calcina también es consistente, ya que según el modelo de programación lineal X₁ y X₂ son directamente proporcionales a porcentajes de conversión de carbono constante. El comportamiento de la variable %Ni en metal (X₃) con respecto a la relación Fe/Ni en calcina es consistente, ya que mayores consumos de carbón, y por ende mayor %C en calcina, se reduce el grado de Ni en metal. Las pérdidas de Ni en escoria deberían incrementarse con la relación Fe/Ni a consumo de carbón constante, sin embargo se observa una tendencia a disminuir al pasar de relación Fe/Ni 8 a 10, debido al

incremento en el consumo de carbón, ya que el modelo intenta compensar el grado de Ni en metal minimizando las pérdidas para mantener el coeficiente de partición de Ni. La restricción de %mínimo de Fe en escoria se cumple suficiente amplitud con respecto al valor mínimo para minimizar la probabilidad de retención de escoria en el FC01.

En cuanto al valor de la función utilidad, se observa una reducción a medida que se incrementa la relación Fe/Ni de la calcina de 8 a 9, y de 9 a 10, pasando de 130.48USD/ton mineral a 125.25USD/Ton mineral, finalmente 116.93USD/Ton mineral. Esto confirma que el proceso es menos rentable cuando se trabaja relaciones Fe/Ni en calcina más altas.

Las tablas con los análisis de sensibilidad muestran dos secciones, celdas de variables y restricciones. En la primera sección se muestran los valores máximos (max) y mínimos (min) que pueden tomar los coeficientes que multiplican las variables de la función objetivo sin que se altere la solución óptima del modelo. En la sección de restricciones se presentan los valores máximos (max) y mínimos (min) que pueden tomar los coeficientes del lado derecho de cada una de las restricciones, siendo válida la aplicación del denominado *precio sombra*, para estimar el efecto del aumento o reducción de dichos coeficientes sobre el valor que toma la función objetivo, en este caso la utilidad del proceso, por medio de la ecuación:

$$Z_{max\ 2} = Z_{max\ 1} + (Coef2 - Coef1) * \text{precio sombra}$$

Por ejemplo, en el modelo L1, Fe/Ni=10, si se reduce el coeficiente del lado derecho de la restricción **Límite comercial %Ni metal >=26%** de 26% a 25%, el nuevo valor de la función objetivo sería:

$$Z_{max\ 2} = 116.926 + (25 - 26) * 0 = 116.926$$

Po lo tanto la función objetivo no es sensible a cambios en el coeficiente de lado derecho de esa restricción en el rango establecido, ya que el precio sombra=0. Ahora si en la restricción **%Ni metal vs %C en calcina $Z_{max}(USD)$** se incrementa el coeficiente del lado derecho en una unidad, la función objetivo utilidad cambia de la siguiente forma:

$$Z_{max\ 2} = 116.926 + (32.88 - 31.88) * 19.74 = 136.666$$

Los mismos principios y algoritmos aplican para el análisis de sensibilidad de cualquiera de los 6 modelos resueltos.

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5			
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		71.82	1.60	28.54	0.137	11.99	$Z_{max}(USD)$		
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.852	-92.070	0	150.217		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-44.769				-	=	0.00
	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina		0.0392		1		0.20	=	0.200
	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina		0.458			1	12.73	=	12.73
	%Ni metal vs %C en calcina		1.185	1			30.44	=	30.441
	Coefficiente de partición Ni>=190			1	-208		-	>=	0.00
	Límite comercial %Ni metal>=26			1			28.54	>=	26.00
	Límite %Fe(FeO)escoria>=11.23					1	11.99	>=	11.23

Tabla 4.4 Modelo resuelto para L2, Fe/Ni=8

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$D\$5:\$H\$5								
	Cons Unitario carbón							
\$D\$5	(Kg/Ton Min)	71.82328363	0	-0.058	0.132280883	1E+30	0.07428088	-1E+30
\$E\$5	%C en calcina	1.604310765	0	0	5.922074203	1E+30	5.9220742	-1E+30
\$F\$5	%Ni en metal FeNi	28.53989174	0	5.852	1E+30	4.997530973	1E+30	0.85446903
\$G\$5	%Ni en escoria	0.137211018	0	-92.07	1E+30	151.0733215	1E+30	-243.14332
\$H\$5	%Fe en escoria	11.99222567	0	0	1E+30	12.93029302	1E+30	-12.930293

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$I\$11:\$I\$13 >= \$K\$11:\$K\$13								
\$I\$11	Coeficiente de partición Ni>=190 Zmax(USD)	0	-0.849822662	0	11.59747991	11.1798	11.5974799	-11.1798
\$I\$12	Límite comercial %Nimetal>=26 Zmax(USD)	28.53989174	0	26	2.539891743	1E+30	28.5398917	-1E+30
\$I\$13	Límite %Fe(FeO)escoria>=11.23 Zmax(USD)	11.99222567	0	11.23	0.762225669	1E+30	11.9922257	-1E+30
\$I\$7:\$I\$10 = \$K\$7:\$K\$10								
\$I\$7	Rest Dosis carbón vs %C en calcina Zmax(USD)	0	-0.058	0	1E+30	71.82328363	1E+30	-71.823284
\$I\$8	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina Zmax(USD)	0.2001	-268.8331137	0.2001	0.055757115	0.053749038	0.25585711	0.14635096
\$I\$9	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina Zmax(USD)	12.727	0	12.727	1E+30	0.762225669	1E+30	11.9647743
\$I\$10	%Ni metal vs %C en calcina Zmax(USD)	30.441	6.701822662	30.441	11.1798	2.170757653	41.6208	28.2702423

Tabla 4.5 Análisis de sensibilidad para L2, Fe/Ni=8

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)		
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		71.93	1.61	27.98	0.134	12.49			
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.852	-92.070	0	147.157		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-44.769				-	=	0.00
	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina		0.0153		1		0.159	=	0.159
	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina		0.3074			1	12.98	=	12.979
	%Ni metal vs %C en calcina		2.4701	1			31.94	=	31.944
	Coeficiente de partición Ni>=190			1	-208		(0.00)	>=	0.00
	Límite comercial %Nimetal>=26%			1			27.98	>=	26.00
	Límite %Fe(FeO)escoria>=11.23					1	12.49	>=	11.23

Tabla 4.5 Modelo resuelto para L2, Fe/Ni=9

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$D\$5:\$H\$5								
	Cons Unitario carbón							
\$D\$5	(Kg/Ton Min)	71.94203737	0	-0.058	0.349415338	1E+30	0.29141534	-1E+30
\$E\$5	%C en calcina	1.606963358	0	0	15.6429524	1E+30	15.6429524	-1E+30
\$F\$5	%Ni en metal FeNi	27.97463981	0	5.852	1E+30	6.332922717	1E+30	-0.4809227
\$G\$5	%Ni en escoria	0.134493461	0	-92.07	1E+30	1022.41519	1E+30	-1114.4852
\$H\$5	%Fe en escoria	12.48501946	0	0	1E+30	50.88793885	1E+30	-50.887939

Restricciones

Celda	Nombre	Final Valor	Sombra Precio	Restricción Lado derecho	Permisible Aumentar	Permisible Reducir	Max	Min
\$I\$11:\$I\$13 >= \$K\$11:\$K\$13								
\$I\$11	Coefficiente de partición Ni>=190 Zmax(USD)	-7.10543E-15	-21.96118546	0	0.569424694	1.14464	0.56942469	-1.14464
\$I\$12	Límite comercial %Nimetal>=26% Zmax(USD)	27.97463981	0	26	1.974639809	1E+30	27.9746398	-1E+30
\$I\$13	Límite %Fe(FeO)escoria>=11.23 Zmax(USD)	12.48501946	0	11.23	1.255019464	1E+30	12.4850195	-1E+30
\$I\$7:\$I\$10 = \$K\$7:\$K\$10								
\$I\$7	Rest Dosis carbón vs %C en calcina Zmax(USD)	0	-0.058	0	1E+30	71.94203737	1E+30	-71.942037
\$I\$8	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina Zmax(USD)	0.15908	-4659.996576	0.15908	0.002737619	0.005503077	0.16181762	0.15357692
\$I\$9	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina Zmax(USD)	12.979	0	12.979	1E+30	1.255019464	1E+30	11.7239805
\$I\$10	%Ni metal vs %C en calcina Zmax(USD)	31.944	27.81318546	31.944	1.14464	0.441973333	33.08864	31.5020267

Tabla 4.5 Análisis de sensibilidad para L2, Fe/Ni=9

Variables de decisión		X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)		
		Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	%C en calcina	%Ni en metal FeNi	%Ni en escoria	%Fe en escoria			
		0.00	0.00	34.21	0.155	15.53			
Coeficientes función objetivo		-0.058	0	5.852	-92.070	0	185.886		
Restricciones	Rest Dosis carbón vs %C en calcina	1	-44.769				-	=	0.00
	%Ni slag(NiO) vs %C en calcina		0.0151		1		0.155	=	0.155
	%Fe slag(FeO) vs %C en calcina		1.653			1	15.530	=	15.530
	%Ni metal vs %C en calcina		3.998	1			34.208	=	34.208
	Coefficiente de partición Ni>=190			1	-208		1.906	>=	0.00
	Límite comercial %Nimetal>=26%			1			34.208	>=	26.00
	Límite %Fe(FeO)escoria>=11.23					1	15.530	>=	11.23

Tabla 4.6 Modelo resuelto para L2, Fe/Ni=10

4.2 Análisis de resultados para la línea 2.

Para línea 2 se observan resultados consistentes con la teoría del proceso DRKEF para los modelos con relación Fe/Ni 8 y 9. Para el modelo con relación Fe/Ni de 10 solo fue posible cumplir las restricciones con un consumo de carbón de 0.0Kg/Ton mineral, lo cual obviamente no tiene sentido, ésta inconsistencia es atribuible a los escasos datos que se tuvieron para realizar las correlaciones de X₂, X₃ y X₄ vs X₂ para éste modelo, como lo muestra

la distribución de la figura 4.1, ya que de los 346 días de operación del año solo el 2.5% (9 días) se ubica en el rango de Fe/Ni de 10.

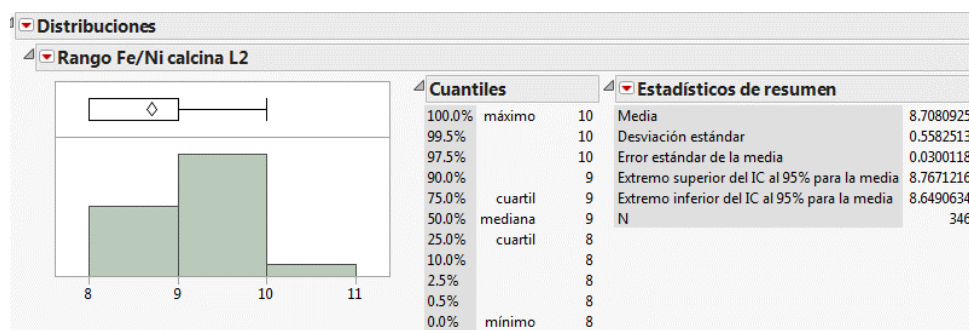


Figura 4.1 Distribución de datos promedio día de relación Fe/Ni en calcina L2 para el FY16

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

Para los modelos a Fe/Ni 8 y 9 el comportamiento de las variables de decisión fue similar a línea con respecto al aumento de relación Fe/Ni, es decir se incrementa el consumo unitario de carbón (X_1) y el %C en la calcina (X_2), el grado de Ni del metal (X_3) se reduce, %Ni en escoria (X_4) se incrementa levemente y el %Fe en escoria (X_5) se mantiene con suficiente amplitud por encima del valor mínimo para reducir la probabilidad de retención de escoria. La combinación de los movimientos de las variables de decisión al pasar de Fe/Ni 8 a 9 reduce la utilidad máxima de proceso de 150.217USD/Ton mineral a 147.157USD/Ton mineral, ratificando que el proceso es más rentable cuando la relación Fe/Ni es más baja, de hecho ese es uno de los retos que enfrenta Cerro Matoso actualmente, los minerales que quedan en el depósito son la mayoría de no muy bajo contenido de Ni y alto contenido de Fe.

Otra observación importante de los resultados es que la utilidad de la línea 2 es más alta que la de línea 1 a los valores de relación Fe/Ni en calcina evaluados (8, 9 y 10), a pesar de que el consumo unitario de carbón es más alto, este efecto es causado por la mayor concentración de Ni en el metal de L2.

Para validar las 5 corridas de optimización ejecutadas (3 de L1 y 2 de L2), se comparan valores históricos reales de las variables que afectan la función objetivo (X_3 , X_4 , X_1) y la función objetivo (calculada a partir de X_3 , X_4 y X_1) versus los resultados del modelo de optimización. Las tablas 4.7 y 4.8 resumen los resultados de las validaciones.

Origen	Relación Fe:Ni en Calcina	%Ni metal FeNi	%Ni Escoria	Consumo unit carbón	Función objetivo	Zmax-Zreal (USD/Ton min)	%Desviación óptimo vs real
	Fe/Ni	X3	X4	X1	Zmáx (USD/Ton min)		
Real	8	28.62	0.150	48.733	129.198	1.27	0.98%
Óptimo	8	28.86	0.152	45.620	130.464		
Real	9	28.23	0.147	49.910	127.467	-2.23	-1.75%
Óptimo	9	27.93	0.147	61.858	125.242		
Real	10	27.59	0.148	51.525	124.055	-7.11	-5.73%
Óptimo	10	26.22	0.138	68.870	116.948		

Tabla 4.7. Validación función objetivo para las tres corridas ejecutadas de L1, Fe/Ni=8, 9 y

10

Para L1 solo a relación Fe/Ni=8 se obtuvo una utilidad optimizada (Z_{max}) mayor que el beneficio económico calculado con los datos reales de L1 cuando ésta línea opera a Fe/Ni en calcina de 8 (0.98% por encima), demostrando que efectivamente hay potencial de incrementar el valor de la función objetivo para éstas condición. Para las otras dos corridas de L1, el valor Z_{max} obtenido por optimización, fue menor que la utilidad real estimada a partir de los valores reales de X_3 , X_4 y X_1 correspondientes al período con Fe/Ni=9 y 10, esto puede

explicarse por la alta variabilidad del % de conversión del carbón en el calcinador L1 ya que dicho parámetro se asumió como constante para las tres corridas y según el análisis estadístico presentó una variabilidad considerable en el año FY2016 (CV=desviación estándar/media=67.3%), mientras que para L2 la variabilidad del %conversión de carbón fue mucho menor (CV=24%) como muestra la distribución de la figura 4.2.

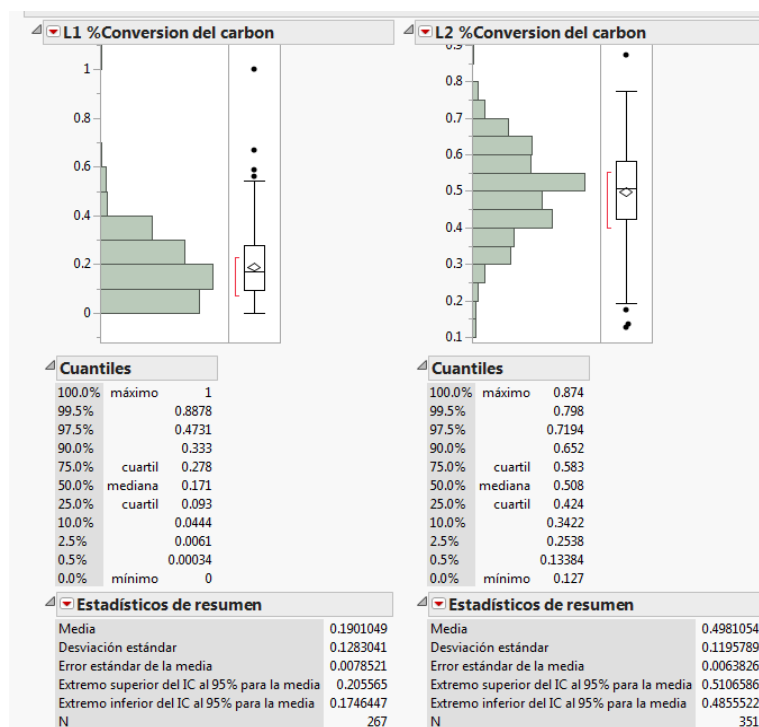


Figura 4.2. Distribuciones de %conversión carbón para L1 y L2

Es conveniente correr los modelos para Fe/Ni=9 y 10, utilizando el valor correspondiente de %conversión de carbón por corrida, y no utilizar el mismo valor para las 3 corridas (se utilizó 19% como único valor de L1 en este caso)

Origen resultado	Relación Fe:Ni en Calcina	%Ni metal FeNi	%Ni Escoria	Consumo unit carbón (Kg/Ton min)	Función objetivo	Zmax-Zreal (USD/Ton min)	%Desviación real vs óptimo
	Fe/Ni	X3	X4	X1	Zmáx (USD/Ton min)		
Real	8	28.64	0.139	69.52	150.799	-0.56169	-0.37%
Óptimo	8	28.54	0.137	71.82	150.237		
Real	9	28.23	0.133	72.26	148.726	-1.55575	-1.06%
Óptimo	9	27.97	0.134	71.94	147.171		

Tabla 4.8. Validación función objetivo para las dos corridas ejecutadas de L2, Fe/Ni=8, 9

Para el caso de L2, en las dos corridas válidas (Fe/Ni=8 y 9) los valores de las variables que afectan la función objetivo y la utilidad de Z óptimo y Z real son realmente muy similares siendo ligeramente superior el beneficio para los datos reales en ambos casos, sin embargo la desviación en porcentaje entre Zreal y Zóptimo es de menos de 1.1%, lo cual indicaría que L2 está operando de forma muy similar al punto óptimo de operación hallado por medio del modelo.

Otra observación importante de los resultados es que la utilidad de la línea 2 es más alta que la de línea 1 a los valores de relación Fe/Ni en calcina evaluados (8, 9 y 10), a pesar de que el consumo unitario de carbón es más alto, este efecto es causado por la mayor concentración de Ni en el metal de L2.

Para aplicar la modelación utilizada en éste trabajo a una nueva pila se deben seguir los siguientes pasos:

1. Verificar que los valores de %Ni en pila y relación Fe/Ni en pila se encuentren en el rango de trabajo del FY16 que fue el año que se tomó como fuente de datos históricos. Se define el rango cuartil 1 a cuartil 3 de la distribución tanto de %Ni en pila como de relación Fe/Ni en pila, como el rango de aplicabilidad de los modelos desarrollados.



Figura 4.3 Distribución de datos de %Ni y relación Fe/Ni en pila para FY16

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

- Una vez se verifica que los valores de %Ni en pila y en la nueva pila se encuentran en el rango 1.376% a 1.424%, y la relación Fe/Ni en pila se encuentra en el rango 8.455 a 8.824, se procede a estimar la relación Fe/Ni en calcina de cada una de las dos líneas de producción, con las regresiones lineales:

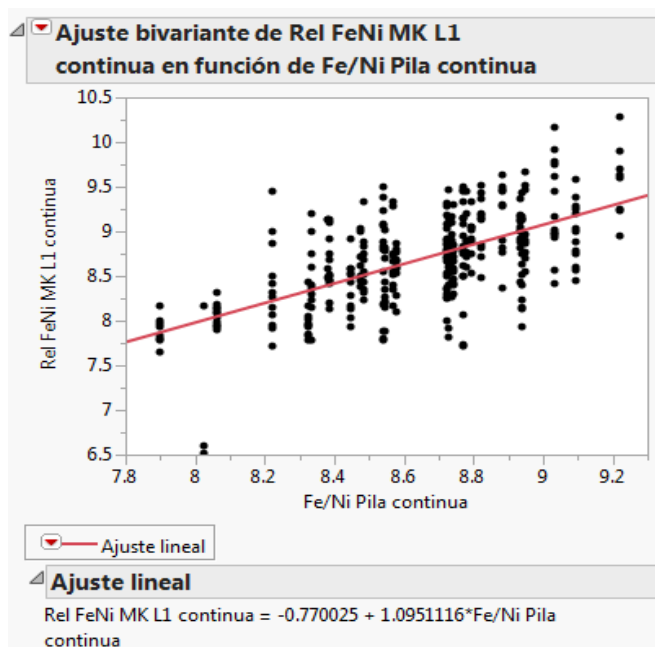


Figura 4.4 Regresión que correlaciona Fe/Ni en pila con Fe/Ni en calcina L1

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

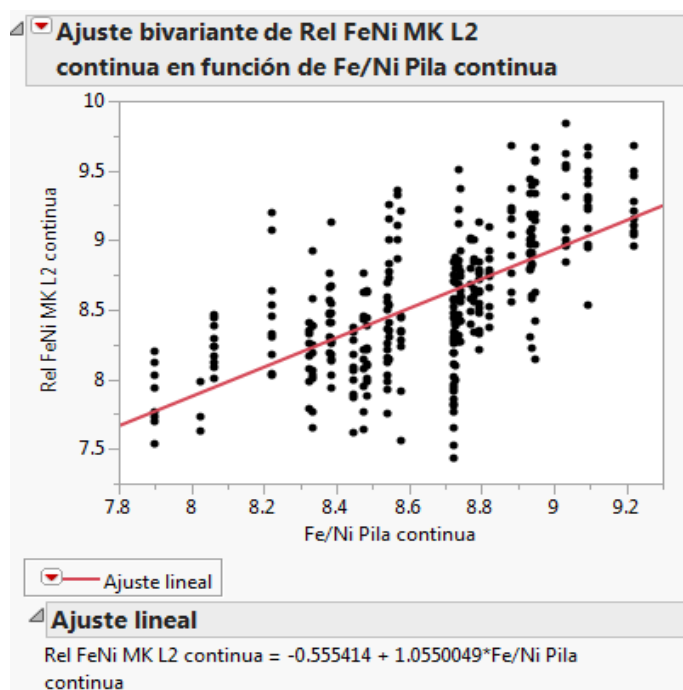


Figura 4.5 Regresión que correlaciona Fe/Ni en pila con Fe/Ni en calcina L2

Fuente: Elaboradas con la aplicación JMP

3. Se redondea el valor estimado de relación Fe/Ni en calcina de L1 y L2 y se procede a seleccionar el modelo que se utilizará L1 8, 9 o 10 y/o L2 8 o 9. Al escoger el modelo, el consumo unitario óptimo queda completamente especificado en el modelo resuelto.

4.3 Resumen del modelo por línea y por relación Fe/Ni

Modelo de optimización para L1

Para Fe/Ni=8 Línea 1

Función objetivo:

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.001 * X1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X1) en función de porcentaje de carbón en la calcina

(X2)

$$X1 - 27.84 * X2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X4) y %C en calcina

(X2)

$$X4 + 0.004373 * X2 = 0.162$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X5) y %C en calcina

(X2):

$$X5 + 0.2134 * X2 = 11.7129$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X_3) y %C (X_2) en calcina

$$X_3 + 0.4258 * X_2 = 29.5574$$

Coeficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X_3 - 190 * X_4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X_3)

$$X_3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X_5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X_5 \geq 10.24$$

Resultados de ejecución del modelo.

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	45.62	1.64	28.86	0.152	11.36	130.483

Para Fe/Ni=9 Línea 1

Función objetivo:

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X_3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X_4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} \\ - 0.001 * X_1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X_1) en función de porcentaje de carbón en la calcina (X_2)

$$X_1 - 27.84 * X_2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X_4) y %C en calcina (X_2)

$$X_4 + 0.01337 * X_2 = 0.1765$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X_5) y %C en calcina (X_2):

$$X_5 + 0.2567 * X_2 = 12.2638$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X_3) y %C (X_2) en calcina

$$X_3 + 0.6491 * X_2 = 29.3595$$

Coefficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X_3 - 190 * X_4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X_3)

$$X_3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X_5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X_5 \geq 10.24$$

Resultados de la ejecución del modelo

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	61.47	2.21	27.93	0.147	11.70	125.246

Para Fe/Ni=10 Línea 1

Función objetivo:

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X_3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X_4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} \\ - 0.001 * X_1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X1) en función de porcentaje de carbón en la calcina (X2)

$$X_1 - 27.84 * X_2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X4) y %C en calcina (X2)

$$X_4 + 0.01632 * X_2 = 0.178$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X5) y %C en calcina (X2):

$$X_5 + 0.7248 * X_2 = 12.9141$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X3) y %C (X2) en calcina

$$X_3 + 3.9981 * X_2 = 34.2079$$

Coeficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X_3 - 190 * X_4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X3)

$$X_3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X_5 \geq 10.24$$

Resultados ejecución del modelo

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	68.87	2.47	26.22	0.138	11.12	116.926

Para Fe/Ni=8 Línea 2

Función objetivo

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.001 * X1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X1) en función de porcentaje de carbón en la calcina

(X2)

$$X1 - 44.769 * X2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X4) y %C en calcina

(X2)

$$X4 + 0.03924 * X2 = 0.201$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X5) y %C en calcina

(X2):

$$X5 + 0.4579 * X2 = 12.7268$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X3) y %C (X2) en calcina

$$X3 + 1.1851 * X2 = 30.4411$$

Coeficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X3 - 208 * X4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X3)

$$X3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X5 \geq 11.23$$

Resultado de la ejecución del modelo

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	71.82	1.60	28.54	0.137	11.99	150.217

Para Fe/Ni=9 Línea 2

Función objetivo

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.001 * X1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X1) en función de porcentaje de carbón en la calcina

(X2)

$$X1 - 44.769 * X2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X4) y %C en calcina

(X2)

$$X4 + 0.01531 * X2 = 0.1591$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X_5) y %C en calcina (X_2):

$$X_5 + 0.3074 * X_2 = 12.9791$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X_3) y %C (X_2) en calcina

$$X_3 + 2.4701 * X_2 = 31.9443$$

Coefficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X_3 - 208 * X_4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X_3)

$$X_3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X_5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X_5 \geq 11.23$$

Resultados de la ejecución del modelo

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	71.94	1.61	27.97	0.134	12.49	147.152

Para Fe/Ni=9 Línea 2

Función objetivo

$$Z_{max} = 0.0532 \text{Ton} * X_3 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.837 * X_4 * 0.01 * \frac{11000 \text{USD}}{\text{ton}} - 0.001 * X_1 * \frac{58 \text{USD}}{\text{Ton}}$$

Restricciones del modelo:

Consumo unitario de carbón (X1) en función de porcentaje de carbón en la calcina (X2)

$$X1 - 44.769 * X2 = 0$$

Regresión lineal experimental entre %Ni como NiO en escoria (X4) y %C en calcina (X2)

$$X4 + 0.01515 * X2 = 0.1553$$

Regresión lineal experimental entre %Fe como FeO en escoria (X5) y %C en calcina (X2):

$$X5 + 1.6531 * X2 = 15.5317$$

Regresión lineal experimental entre %Ni en FeNi (X3) y %C (X2) en calcina

$$X3 + 1.1851 * X2 = 30.4411$$

Coefficiente de partición de Ni: (%Ni en FeNi)/ %Ni escoria

$$X3 - 208 * X4 \geq 0$$

Restricción comercial para %Ni mínimo en metal (X3)

$$X3 \geq 26$$

Restricción %Fe mínimo en escoria (X5) para evitar el fenómeno indeseado de retención de escoria

$$X5 \geq 11.23$$

Resultados de la ejecución del modelo

Variables de decisión	X1	X2	X3	X4	X5	Zmax(USD)
	Cons Unitario carbón (Kg/Ton Min)	% C en calcina	% Ni en metal FeNi	% Ni en escoria	% Fe en escoria	
	0.00	0.00	34.21	0.155	15.53	185.886

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

Se concluye:

- En el desarrollo de éste trabajo se cumplió con el objetivo general y los cuatro objetivos específicos propuestos.
- La utilidad máxima de la línea 2 fue más alta que la utilidad máxima de la línea 1 a cualquiera de los valores de relación Fe/Ni en calcina evaluados (L1=8, 9, 10; L2=8, 9), esto coincide con lo observado en planta DRKEF, en donde ingenieros y supervisores priorizan la operación de la línea 2 sobre la de línea 1.
- El consumo unitario óptimo de carbón de ambas líneas se comportó como era esperado, es decir, creciente con respecto a la relación Fe/Ni en calcina. De acuerdo a lo esperado y debido a la recirculación de finos es alimentada completamente a la línea 2, el consumo unitario de carbón de ésta línea presentó consistentemente mayores valores que línea 1, esto se debe al mayor contenido de Fe en los finos que se recirculan únicamente hacia la línea 2.

- Para los 5 modelos representativos de los 6 resueltos (se descarta L2, Fe/Ni=10), se observa que los coeficientes del lado derecho de las restricciones de las celdas \$I\$12, \$I\$13 e \$I\$9 (ver reportes de sensibilidad) no afectan el valor maximizado de la función objetivo (Z_{max}), ya que tienen un *precio sombra* = 0.
- La metodología utilizada puede ser utilizada en la generación de modelos de programación lineal para estimar el consumo óptimo de carbón del proceso DRKEF para alimentar pilas con diferentes rangos de %Ni y Fe/Ni, siempre y cuando se cuente con los datos históricos suficientes.

Se recomienda:

- Implementar los resultados obtenidos en éste trabajo en la operación de las líneas 1 y 2 del proceso DRKEF de Cerro Matoso, teniendo en cuenta los rangos de aplicabilidad en términos de %Ni en pila, Fe/Ni en pila, %conversión de carbón en los calcinadores (esto está ligado directamente al perfil de temperatura de los calcinadores), los principales beneficios que se obtendrían al aplicar los resultados de los modelos desarrollados serían:
 - ✓ Reducción del consumo unitario de carbón (costo insumo variable)
 - ✓ Reducir paradas de calcinador por retención de escoria de alta viscosidad a causa de bajo contenido de Fe.
 - ✓ Incrementar grado de Ni en metal y garantizar que no sea inferior a 26% (restricción de marketing), adicionalmente reducir el número de coladas diarias,

mensuales y anuales que se requieren para cumplir con los planes de producción de Ni de Cerro Matoso S.A.

- ✓ Definir el valor de referencia de %C en calcina para que los operadores de calcinador y horno eléctrico ajusten las variables operativas oportunamente de tal forma que se facilite mantener el proceso en control.
- Mejorar el sistema de muestreo de calcina, se toma en una de las tolvas del horno eléctrico para ambas líneas, esto afecta la representatividad de la muestra para el análisis de %C, ya que debería tomarse a la descarga del calcinador. %C en calcina es una variable clave para el control del proceso RKEF y el muestreo actual en ambas líneas requiere mejoramiento.
- Recopilar datos de operación a Fe/Ni en calcina=10 para la línea 2, de tal forma que al resolverse el modelo los resultados sean coherentes con la realidad operativa de la línea 2.
- Actualizar los modelos de programación lineal de L1 y L2 teniendo en cuenta los incrementos en los perfiles de temperatura de los calcinadores KN01 y KN150 durante el FY17, esto reduce %C en calcina, y por ende el consumo unitario de carbón se debe reducir, también se espera que disminuyan las pérdidas de Ni en escoria al lograr una mayor reducción de Ni en los calcinadores de ambas líneas.